



Universitat de les Illes Balears
Departament de Física

Programa de doctorat dels Estudis Oficials de Postgrau: Doctorat de Física

Comportamiento Óptico y Térmico de un Concentrador Solar Lineal con Reflector Estacionario y Foco Móvil

Tesis Doctoral

Ramón Pujol Nadal

(Director: Dr. Víctor Martínez Moll)

Junio 2012



**Universitat de les
Illes Balears**

El director de Tesis Víctor Martínez Moll, profesor Titular de Escuela Universitaria adscrito al Departamento de Física de la *Universitat de les Illes Balears*, certifica que esta Tesis Doctoral ha sido realizada por el Sr. Ramón Pujol Nadal bajo su dirección, y para que quede constancia escrita firma la presente

en Palma 4 de Junio de 2012,

Víctor Martínez Moll

Ramón Pujol Nadal

Dedicatoria

Dedicat a sa meva padrina Joana, amics, germana, cosins, i nebots.

Agradecimientos

Completar la tesis doctoral ha resultado ser una experiencia única. Época de aprendizaje en muchos aspectos, como el trabajo en grupo, participación en congresos, escribir un artículo, exposición oral de resultados, escribir código, rectificar código, comprobar código, permanecer hasta altas horas de la madrugada, ..., y en ocasiones (más de las deseables) estar en un estado de ofuscación (que aprovecho para pedir 1000 disculpas en este mismo momento).

Siento una gran satisfacción al escribir estas palabras, porque es síntoma que la tesis ya ha tomado su forma. No hubiera sido posible sin la ayuda, colaboración, y apoyo de las personas que, de alguna manera u otra, han participado en que se pudiera presentar este trabajo.

En primer lugar quiero agradecer a mi director, Víctor Martínez Moll, por la paciencia y confianza depositada en mí. Los inicios no fueron fáciles, pero el trabajo diario nos ha demostrado que con dedicación y esfuerzo es posible llegar a la meta. Víctor ha sido mi guía durante este largo recorrido, y fruto de ello se ha formado una nueva amistad. Agradezco su cercanía y trato personal, así como las oportunidades, y retos, que me sigue brindando al permitirme estar a su lado en la Universidad.

Quiero agradecer a Andreu Moià Pol las tareas previas realizadas a los estudios que aquí se presentan. Gracias a Andreu se ha podido disponer de un prototipo de gran envergadura (CCStaR V1) para la elaboración de la parte experimental de la tesis. A nivel personal quiero agradecerle la paciencia, tranquilidad, y confianza transmitidas durante todo este tiempo. Andreu hizo posible que yo obtuviera mi primera beca en la Universidad.

Agradezco a Domingo Muñoz Salvá la implicación que tuvo desde el primer instante en el proyecto. No me imagino esta tesis sin el apoyo inicial que tuvo Domingo. Gracias a ello ha sido posible mi participación en dos patentes como inventor, conocer de primera mano una empresa *spin-off* de la UPC y de la UIB, y conocer la parte práctica-empresarial de un proyecto de investigación. Espero que continuemos juntos y lleguemos al fin propuesto.

Agradezco a Jaume Salom Tormo por dejarme aprender a su lado con su saber hacer, sin su presencia muchas de las cosas que aquí se presentan no hubieran sido posibles por falta de iniciativa. Admiro su eficacia en el trabajo.

Agradezco a Hans Schweiger por la gran visión que tuvo al rescatar una patente de los años setenta ya olvidada. Hans propuso analizar el FMSC con métodos modernos visualizando una nueva etapa para esta geometría. Resultó ser el inicio de mi investigación.

Quiero agradecer también a Gabriel Trobat Obrador su paciencia, y siempre disposición a la hora de afrontar retos nuevos. Biel desde el primer día ha sido un compañero de batalla. Son muchas las anécdotas (y risas) que sin él no hubieran ocurrido. Admiro su optimismo, alegría, humor, y comprensión. Siempre se ha preocupado de introducir en las eternas jornadas laborales un toque distendido, lo cual nos ha venido muy bien a todos en momentos de agotamiento...

Agradezco la colaboración inestimable de Raúl Sánchez en la instalación del banco de ensayos, y a Miquel Lleó por la ayuda durante la realización de los mismos. Quiero agradecer a Vicenç Canals su ayuda en el montaje y reparación de software. También agradecer a Benito Más la ayuda durante los ensayos realizados. Me siento muy afortunado, y agradecido, por la gran ayuda que me habéis brindado. Gracias.

Agradezco a mis compañeros de despacho el apoyo recibido constantemente. A Carlos, Juanlu, y Bea. De Carlos me quedo (y sigo quedando) con su optimismo y felicidad, es una alegría verlo entrar por esa puerta sonriente y dando grandes abrazos. A Juanlu, a pesar de su corta estancia por el despacho, aún se le echa a faltar. Le agradezco los momentos buenos que me dio, y por venir a Menorca y disfrutar de unas fiestas a lo grande (¡Impresionante!). Bea, gran compañera desde hace más de 15 años, es y ha sido un puntal en mi vida. Le agradezco las palabras de ánimo, cariño, apoyo, y comprensión siempre recibidas. Gracias.

No puedo olvidarme de mis orígenes, desde mis amigos en la guardería (que aún conservo), pasando por el colegio e instituto, hasta compañeros de carrera, y amigos varios que tengo cerca desde hace años. A todos vosotros gracias por darme tantas alegrías y momentos maravillosos.

Agradezco a mi hermana Juana, y a mis primos Jaume, Dani, y Esther por el apoyo mostrado. Agradezco también a mi abuela Juana, que gracias a su apoyo he podido dedicarme a lo que más deseaba. Y luego agradecer a las dos personitas que más quiero en mi vida, a mis sobrinos Adrià i Núria, por darme tantos y tantos sábados felices, llenos de amor, inocencia, vitalidad, y risas infantiles. Os amo.

Agradezco a la entidad Tecnología Solar Concentradora SL porque para mi ha sido un gran escenario. Fruto del esfuerzo de todos nosotros y que, sin duda, llegará muy lejos con la tecnología que pretende dar a conocer. Estoy convencido que una empresa dedicada 100 % a la I+D también tiene cabida en nuestro país. En esto creemos y por ello lo conseguiremos.

Por último, quiero agradecer a la institución *Universitat de les Illes Balears*, y en especial al *Departament de Física*, por ser el lugar donde se han llevado a cabo las tareas necesarias para la elaboración de la tesis doctoral, y por ser mi “segunda casa” durante tanto tiempo.

Siento un gran agradecimiento por todos los seres que me han ayudado y que siempre han estado, están, y estarán ¡Muchas gracias de todo corazón!

Resumen

El consumo energético mundial ha experimentado un incremento exponencial en los últimos dos siglos. Al ser los combustibles fósiles la fuente de energía primaria más utilizada, este incremento se ha traducido en un incremento paralelo en la concentración de CO_2 en la atmósfera, que es el responsable en gran medida del cambio climático que experimenta actualmente el planeta. En este contexto, la búsqueda de soluciones tecnológicas que permitan el uso cada vez más generalizado de energías renovables para sustituir a los combustibles fósiles tiene una importancia capital.

Existe un gran potencial de la energía solar térmica para calor de proceso, en aplicaciones que requieren temperaturas entre 100 y 250°C. Este calor puede ser generado mediante tecnología solar térmica. No obstante, la implantación de este tipo de sistemas es muy reducida en comparación con su potencial teórico. Esto se debe principalmente a dos motivos: el coste energético de los sistemas actuales no es competitivo, y los sistemas de concentración presentan serios inconvenientes para ser instalados en cubiertas de los edificios.

El concentrador solar *Fixed Mirror Solar Concentrator* (FMSC) apareció en los años 70 con la finalidad de reducir costes en la producción de energía termoelectrónica. Este diseño consiste en un concentrador de reflector estacionario y foco móvil, presenta buena integrabilidad en cubiertas, y es capaz de alcanzar temperaturas entre 100 y 200°C manteniendo una eficiencia aceptable.

En esta tesis se expone una metodología para determinar el comportamiento del FMSC. Se ha desarrollado una herramienta de cálculo basada en el método de *ray-tracing*, que simula el trazado de los rayos solares en el sistema óptico. Con esta herramienta se ha analizado el comportamiento óptico y térmico del FMSC, y de la versión con espejos curvos *Curved Slats Fixed Mirror Solar Concentrator* (CSFMSC). Se ha realizado un análisis paramétrico para conocer la influencia de los distintos parámetros de diseño en el modificador de ángulo (IAM), y para obtener los diseños óptimos a una temperatura de 200°C para tres climas en diferentes latitudes.

Se han comparado los valores teóricos obtenidos mediante ray-tracing con dos prototipos ensayados, obteniendo un buen ajuste en ambos casos. Los ensayos han sido utilizados para determinar la curva de rendimiento de uno de los prototipos. Se ha hecho uso del método propuesto en la norma EN-12975-2:2006 combinado con valores de IAM obtenidos mediante *ray-tracing*. Se prueba que esta combinación puede ser útil para obtener la curva de rendimiento de colectores complejos con un modelo biaxial para el IAM.

Palabras clave

energía solar, concentrador solar, media temperatura, FMSC, CSFMSC, trazado de rayos, prototipos, caracterización óptica, caracterización térmica, reflector estacionario, foco móvil, calor de procesos, IAM, modificador de ángulo, factorización del IAM, eficiencia óptica, eficiencia térmica, EN-12975-2:2006, energías renovables, método cuasi-dinámico

Abstract (en inglés)

Global energy consumption has increased exponentially during the last decades. As fossil fuels are the most used primary energy source, this increase has produced a parallel increment in the atmospheric CO₂ concentrations, which is to a large extent responsible for the observed climate change of the Earth. In this context, the search for new technological solutions that allow for widespread uses of the renewable energy sources is of paramount importance for the substitution of fossil fuels that leads to the reduction of greenhouse gas emission levels.

There is a large energy consumption in process heat applications requiring temperatures between 100 and 250°C. This energy could be supplied by means of solar thermal collectors. Nevertheless the implantation of such systems is very reduced in comparison with its theoretical potential. This is due to two main facts: first, the cost of the current available systems is not competitive compared to fuels like natural gas, and second, conventional concentration systems show serious problems in order to be integrated into building roofs.

The Fixed Mirror Solar Concentrator (FMSC) appeared during the 70s with the aim of reducing costs in the production of electricity in solar thermal power plants. This design consists of a concentrator with fixed reflector and moving receiver, has a very good integrability into building roofs and can reach temperatures between 100 and 200°C with an acceptable efficiency.

In this Thesis a methodology is presented for the determination of the behaviour of the FMSC. A simulation tool based on the forward ray-tracing method has been developed. The optical and thermal behaviour of the FMSC and its curved mirror variation called the Curved Slats Fixed Mirror Solar Concentrator (CSFMSC), have been analyzed with this tool. A parametric analysis has been carried out in order to determine the influence of the different parameters on the Incidence Angle Modifier (IAM) and to determine the optimal designs at a temperature of 200°C for three different climates at different latitudes.

The theoretical values obtained from the ray-tracing code have been compared with two experimental prototypes. The experimental and numerical results obtained show a good fit. The efficiency curve of one of the prototypes has been determined from the experimental tests. The methodology proposed in the norm EN-12975-2:2006 has been used in combination with IAM values obtained by ray-tracing. It has been shown that this combination can be effectively used to obtain the efficiency curve of complex collectors with a bi-axial IAM model.

Keywords

solar energy, solar concentrator, medium temperature, FMSC, CSFMSC, ray tracing, prototypes, optical characterization, thermal characterization, stationary reflector, mobile focus, process heat, IAM, incidence angle modifier, optical efficiency, thermal efficiency, EN-12975-2:2006, renewable energy, quasi-dynamic method

Trabajos publicados

Patentes publicadas

1. Martínez Moll, V., Pujol Nadal, R., Paz Vernaless, H., Riba Romeva, C., Martínez Verdú, D., Moià Pol, A., Schweiger, H., 2007. Dispositivo concentrador-captador de energía solar'. Tecnología Solar Concentradora SL. Patente Española ES2322837B1.
2. Martínez Moll, V., Pujol Nadal, R., Montesino Semper, J., Moià Pol, A., Paz Vernaless, H., Trobat Obrador, G., 2007. Unidad reflectora-concentradora, procedimiento de fabricación de la misma, y dispositivo captador solar comprendiendo dicha unidad reflectora-concentradora. Tecnología Solar Concentradora SL. Patente Española ES2326353B1.

Artículos publicados en revistas internacionales

1. Pujol Nadal, R., Martínez, V., 2012. Optical Analysis of the Fixed Mirror Solar Concentrator by Forward Ray-Tracing Procedure. ASME Journal of Solar Energy Engineering 134, 031009-(1-14).

Artículos publicados en revistas nacionales

1. Pujol Nadal, R., Moià Pol, A., Martínez, V., 2011. Análisis para aplicaciones de media temperatura. Concentrador solar lineal con reflector estacionario y foco móvil. Era Solar. 165.

Contribuciones en congresos

1. Pujol, R., Martínez, V., Moià, A., Schweiger, H., 2006. Analysis of stationary Fresnel like concentrator with tracking absorber. In: SolarPACES, 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies. Sevilla, Spain. A7-P3. ISBN 84-7834-519-1.
2. Martínez, V., Pujol, R., Moià, A., Schweiger, H., 2006. Analysis of a stationary parabolic linear concentrator with tracking absorber. In: SolarPACES, 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies. Sevilla, Spain. A7-P4. ISBN 84-7834-519-1.
3. Alorda, B., Moià, A., Pujol, R., Martínez, V., 2006. Low-cost orientation system for a concentraating solar collector with static reflector and tracking receiver. In: International Congres on Renewable energies and Power Quality. ICREPQ06. ISBN: 84-609-6604-6.
4. Pujol Nadal, R., Moià Pol, A., Martínez, V., 2008. Análisis de un concentrador solar lineal con reflector estacionario y foco móvil para aplicaciones de media temperatura. In: XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energía Solar (CIES 2008).
5. Martínez Moll, V., Pujol Nadal, R., Moià Pol, A., 2008. Un concentrador solar innovador de reflector estático y foco móvil para procesos de calor. In: XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energía Solar (CIES 2008).
6. Moià Pol, A., Pujol Nadal, R., Martínez Moll, V., 2008. Potencial de instalaciones de captadores solares de baja y media temperatura para aplicaciones industriales. In XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energía Solar (CIES 2008).
7. Martínez, V., Pujol, R., Moià, A., 2008. Innovative Fixed Mirror Solar Concentrator for Process Heat. In: 1st International Congress on Heating, Cooling, and Buildings. (Eurosun 2008).
8. Pujol Nadal, R., Alomar, M., Moià Pol, A., Martínez, V., 2010. Development status of Concentrating Collector with Stationary Reflector (CCStaR). In: 2nd International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings. (Eurosun 2010).
9. Martínez, V., Pujol, R., Moià, A., 2011. Design Improvements and Evaluation of the New CCStaR Collector. In: ISES. Solar World Congress.

Índice general

Dedicatoria	III
Agradecimientos	V
Resumen	VII
Abstract (en inglés)	IX
Trabajos publicados	XI
Índice de Figuras	XXV
Índice de Tablas	XXIX
Nomenclatura	XXXI
1. Introducción	1
1.1. Necesidad de un cambio en el modelo energético	1
1.2. La energía solar térmica en Europa	4
1.3. Concentradores solares térmicos	6
1.4. Estructura y objetivos de la Tesis Doctoral	9
1.4.1. Objetivos	9
1.4.2. Contenidos de la Tesis Doctoral	9

2. Marco teórico	11
2.1. Ondas electromagnéticas	11
2.2. Radiación de cuerpo negro	12
2.3. Propiedades ópticas de los materiales	13
2.3.1. Reflectancia	14
2.3.2. Transmitancia	17
2.3.3. Absortancia	18
2.4. El tamaño angular del Sol	19
2.5. Rendimiento del captador solar térmico	21
2.6. Consideraciones ópticas de los concentradores solares	25
3. El concentrador solar lineal FMSC	27
3.1. Antecedentes	27
3.2. La geometría del FMSC	31
3.2.1. Existencia del foco	31
3.2.2. Definición de la geometría del reflector	33
3.2.3. Posición del foco	37
3.2.4. El receptor	38
3.3. Resultados	39
3.4. Conclusiones	41
4. Metodología utilizada	43
4.1. Métodos de análisis de concentradores solares	43
4.2. Código <i>forward-ray-tracing</i>	44
4.2.1. Intersección de un rayo con un triángulo	47
4.2.2. Generación de números aleatorios	47
4.2.3. El tamaño angular del sol	48
4.2.4. Tipos de materiales	50
4.2.5. Eficiencia óptica	51
4.3. Condiciones climáticas	52
4.4. Ángulos de posicionamiento solar respecto al concentrador	54
4.5. Eficiencia térmica del concentrador solar	56
4.6. Conclusiones	58

5. Análisis del FMSC	59
5.1. Objetivos	59
5.2. Casos analizados	59
5.3. Análisis óptico del FMSC. Resultados y discusión	65
5.3.1. Eficiencia óptica	65
5.3.2. IAM transversal	66
5.3.3. IAM longitudinal	70
5.3.4. Aproximación factorizada del IAM	74
5.3.5. Distribución de densidad de radiación en el receptor	77
5.4. Eficiencia térmica del FMSC. Resultados y discusión	78
5.5. Conclusiones	92
6. Análisis del FMSC con espejos curvos: CSFMSC	95
6.1. Antecedentes	95
6.2. Objetivos	96
6.3. Definición de la geometría	96
6.4. Casos analizados	100
6.5. Análisis óptico del CSFMSC. Resultados y discusión	100
6.5.1. Eficiencia óptica	100
6.5.2. IAM transversal	101
6.5.3. IAM longitudinal	105
6.5.4. Aproximación factorizada del IAM	108
6.5.5. Distribución de radiación en el receptor	111
6.6. Eficiencia térmica del CSFMSC. Resultados y discusión	112
6.7. Conclusiones	125
7. Ensayos experimentales de dos prototipos	127
7.1. Ensayos experimentales de un prototipo FMSC: CCStaR V0	127
7.1.1. Descripción del prototipo CCStaR V0	128
7.1.2. Banco de ensayos y equipos de medida	129

7.1.3. Eficiencia óptica del receptor	137
7.1.4. Determinación experimental del comportamiento óptico del CCStaR V0	141
7.1.5. Comportamiento óptico del CCStaR V0 mediante <i>ray-tracing</i>	144
7.2. Ensayos experimentales de un prototipo CSFMSC: CCStaR V1	147
7.2.1. Descripción del prototipo CCStaR V1	147
7.2.2. Análisis de la calidad geométrica del CCStaR V1	158
7.2.3. Comportamiento óptico del CCStaR V1 mediante <i>ray-tracing</i>	162
7.2.4. Banco de ensayos y equipos de medida	165
7.2.5. Determinación experimental del comportamiento óptico del CCStaR V1	168
7.2.6. Determinación experimental del comportamiento térmico del CCStaR V1	173
7.3. Conclusiones	179
8. Conclusiones finales	181
Bibliografía	183

Índice de figuras

1.1.	Evolución de las fuentes de energía primaria utilizada entre 1973 y 2009. Fuente IEA	3
1.2.	Porcentajes globales de fuente de energía primaria utilizada en 2009. Fuente IEA	3
1.3.	Desglose del uso final de la energía en Europa. Fuente: <i>European Solar Thermal Technology Platform</i> (Bokhoven et al., 2006)	5
1.4.	Concentrador cilindro-parabólico de pequeñas dimensiones CAPSOL-2. Plataforma Solar de Almería (Fernández et al., 2010b)	8
1.5.	a): Fotografía del <i>Linear concentrating Fresnel reflector</i> . <i>Fraunhofer ISE</i> y <i>DLR Institute for Technical Thermodynamics</i> . b): Fotografía del prototipo <i>Fix-Focus-Trough</i> . Ubicado en la plataforma de ensayos del <i>DLR</i> , Köln. (Weiss and Rom, 2005)	8
1.6.	a): Central termoeléctrica de torre central (Torresol Energy, Sevilla). b): Central termoeléctrica de discos paraboloïdes con motores Stirling (Renovalia/Infinitia, Albacete)	8
2.1.	Radiación de cuerpo negro para 6000°C y 100°C. Notar las diferentes escalas en los ejes	13
2.2.	Visualización de las leyes básicas de la reflexión y de la refracción	14
2.3.	Visualización del rayo dispersado \vec{v}' un ángulo θ respecto la dirección teórica \vec{v}	16
2.4.	Transmisividad del vidrio borosilicato 3.3 para diferentes espesores de pared. Fuente <i>Schott</i> www.schott.com	17
2.5.	Absortancia normalizada de diferentes materiales en función del ángulo de incidencia	19
2.6.	Ángulos transversal θ_t y longitudinal θ_l respecto el sistema de tubos de vacío. Los ángulos de posicionamiento del Sol respecto el sistema de los tubos de vacío son: Θ_{cs} para el ángulo zenital solar y Φ_{cs} para el ángulo azimutal solar	24

3.1. Visualización del principio óptico en el que se basa el diseño SRTA. Las líneas paralelas representan los rayos solares que al incidir en un espejo circular se reflejan hacia un mismo punto para el segmento donde el círculo se aproxima a la forma de la parábola (aproximación paraxial). Se observa la trayectoria circular que describe el receptor	29
3.2. Visualización del principio óptico en el que se basa el diseño FMSC. Las líneas paralelas representan los rayos solares que, al incidir en el punto en común entre el espejo y el círculo generatriz, se reflejan hacia un mismo punto. Se observa la trayectoria circular que describe el receptor	29
3.3. Visualización de la proposición III.21 del Libro Elementos de Euclides, también conocida como “arco capaz”	31
3.4. Dos <i>rectas paralelas 1 y 2</i> después de una reflexión en los <i>espejos 1 y 2</i> interceptan en el punto <i>P</i>	32
3.5. Las <i>rectas paralelas 3 y 4</i> interceptan en <i>P'</i> . Se exponen los ángulos de intersección entre rectas	32
3.6. Demostración geométrica de la existencia de un foco sobre el círculo generatriz	33
3.7. Construcción geométrica del reflector	35
3.8. Geometría del FMSC para $F/W=1.5$ y $N=11$	36
3.9. Reflexión de un rayo solar en el punto medio del espejo central para la determinación de la posición del foco.	37
3.10. Dimensiones del tubo evacuado considerado como receptor en unidades $1000 \times u$ para un caso analizado con $N=25$ y $F/W=1.0$	39
3.11. Dependencia de la anchura de los espejos (a), semiángulo de apertura (b) y altura del concentrador (c) en función de N para valores $F/W=1.00, 1.25, 1.50, 2.0$ y 3.00	40
3.12. (a): Concentración máxima en función de N . (b): Horas de seguimiento solar en función de N . Curvas para $F/W=1.00, 1.25, 1.50, 2.00$ y 3.00	41
4.1. Salida gráfica del <i>ray-tracing</i> con 300 rayos emitidos utilizando el visualizador MayaVi (http://mayavi.sourceforge.net/). (a): visión global del sistema, rayos y ventana solar. (b): vista frontal del mismo trazado de rayos en la región del receptor. Se observan las diferentes trayectorias de los rayos causados por reflexión, refracción y dispersión.	45
4.2. Esquema del código <i>ray-tracing</i>	46
4.3. Función distribución de probabilidad para un rayo solar desviado un ángulo θ para diferentes valores de CSR	49

4.4. Programa en TRNSYS para generar los datos climatológicos. Dos generadores del clima <i>Type 109</i> sirven para determinar la irradiación en el plano del captador (inclinación 15° y orientación Sur), y para determinar la irradiación directa normal al Sol (DNI). Se guardan valores cada 0.1 hora y promedios mensuales en ficheros de salida	53
4.5. Datos climatológicos de las tres localidades consideradas: a) Irradiancia directa mensual en un plano inclinado 15° y orientación sur. b) Irradiancia difusa mensual en un plano inclinado 15° y orientación sur. c) Temperatura media mensual durante las horas de Sol.	54
4.6. Rotaciones para determinar la orientación del concentrador solar respecto al sistema local de coordenadas	55
5.1. Densidad de radiación normalizada en la superficie del absorbedor para el caso $N=25$, $F/W=1.0$, $\sigma_B=8$ mrad y $CSR=0.05$ para diferentes valores del factor de intercepción y para el caso $A_r = \frac{1}{25}$ ($\gamma=0.82$). La apertura W y la longitud axial del concentrador han sido considerados como $1u$. Se ha considerado $\rho_{2\pi}=1$ y un absorbedor ideal. El cálculo se ha realizado con <i>ray-tracing</i> con la emisión de un millón de rayos y el receptor ha sido discretizado en 500 segmentos transversales.	61
5.2. Concentración geométrica en función del número de espejos para diferentes valores de F/W y γ	63
5.3. Dimensiones del tubo evacuado considerado en unidades $1000 \times u$ para el caso de $\gamma=0.98$, $N=25$ y $F/W=1.0$	64
5.4. Eficiencia óptica en incidencia normal en función del número de espejos para diferentes valores de los parámetros de diseño adoptados	65
5.5. Curvas del IAM transversal dependiendo del valor de F/W para diferentes valores de N y γ	67
5.6. Curvas del IAM transversal dependiendo del número de espejos N para diferentes valores de F/W y γ	68
5.7. curvas del IAM transversal dependiendo del factor de intercepción γ para diferentes valores de N y F/W	69
5.8. Curvas del IAM longitudinal dependiendo del valor de F/W para diferentes valores de N y γ	71
5.9. Curvas del IAM longitudinal dependiendo del número de espejos N para diferentes valores de F/W y γ	72
5.10. Curvas del IAM longitudinal dependiendo del factor de intercepción γ para diferentes valores de N y F/W	73

5.11. Caso analizado $N=45$, $F/W=1.0$ y $\gamma=0.92$. Los valores en los estimadores del error son $RMSE=0.0252$, $MBE=-0.0021$, $MAE=21.43\%$, y $ME=16.31\%$. (a): IAM calculado por factorización y valor real mediante <i>ray-tracing</i> . (b): error al calcular IAM a partir de la factorización $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$ en lugar de $K(\theta_t, \theta_l)$	76
5.12. Caso analizado $N=25$, $F/W=1.25$ y $\gamma=0.98$. (a): IAM calculado por factorización y valor real mediante <i>ray-tracing</i> . (b): error al calcular IAM a partir de la factorización $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$ en lugar de $K(\theta_t, \theta_l)$. Los valores en los estimadores del error son $RMSE=0.0154$, $MBE=-0.0041$, $MAE=3.56\%$, y $ME=-0.55\%$	76
5.13. Distribución local de la densidad de radiación en el receptor	78
5.14. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Palma de Mallorca.	81
5.15. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\alpha_c=15^\circ$. Clima de Palma de Mallorca.	82
5.16. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de El Cairo.	83
5.17. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\alpha_c=15^\circ$. Clima de El Cairo.	84
5.18. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Múnich.	85
5.19. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\alpha_c=15^\circ$. Clima de Múnich.	86
6.1. Reflector CSFMSC con ratio $F/W=1.0$ y $N=3$ espejos parabólicos de concentración $C_a=10$. Se observa el trazado de rayos para incidencia normal y para $\theta_t=45^\circ$. Se observa la propiedad de arco capaz para los puntos en común de las parábolas y el círculo generatriz.	98

6.2. Concentrador solar CSFMSC de cinco espejos parabólicos, $N=5$, $F/W=1.0$, y $C_a=10$. Las parábolas concentran la radiación directa. Trazado de rayos para $\theta_t=0^\circ$ y $\theta_t=30^\circ$	99
6.3. Concentrador solar CSFMSC de cinco espejos parabólicos, $N=5$, $F/W=1.0$, y $C_a=10$. Las parábolas concentran la radiación directa. Trazado de rayos para $\theta_t=45^\circ$ y $\theta_t=57^\circ$. El caso $\theta_t = 57^\circ$ corresponde al ángulo límite a partir del cual el receptor se queda inmóvil para ángulos de incidencia mayores, $\theta_{f,LIM}=114^\circ$	99
6.4. Eficiencia óptica en incidencia normal en función de la concentración de aperturas para diferentes valores de los parámetros de diseño adoptados	101
6.5. Curvas del IAM transversal dependiendo del valor de F/W para diferentes valores de C_a y N	103
6.6. Curvas del IAM transversal dependiendo del valor de C_a para diferentes valores de F/W y N	104
6.7. Curvas del IAM transversal dependiendo del valor de N para diferentes valores de C_a y F/W	105
6.8. Curvas del IAM longitudinal dependiendo del valor de F/W para diferentes valores de C_a y N	106
6.9. Curvas del IAM longitudinal dependiendo del la concentración C_a para diferentes valores de F/W y N	107
6.10. Curvas del IAM longitudinal dependiendo del número de espejos N para diferentes valores de C_a y F/W	108
6.11. Caso analizado $N=1$, $F/W=3.0$ y $C_a=3$. Los valores en los estimadores del error son $RMSE=0.0614$, $MBE=-0.0206$, $MAE=7.68\%$ y $ME=7.55\%$. (a): IAM calculado por factorización y valor real mediante <i>ray-tracing</i> . (b): error al calcular IAM a partir de la factorización $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$ en lugar de $K(\theta_t, \theta_l)$	110
6.12. Caso analizado $N=7$, $F/W=1.00$ y $C_a=24$. (a): IAM calculado por factorización y valor real mediante <i>ray-tracing</i> . (b): error al calcular IAM a partir de la factorización $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$ en lugar de $K(\theta_t, \theta_l)$. Los valores en los estimadores del error son $RMSE=0.0109$, $MBE=-0.0035$, $MAE=3.47\%$ y $ME=-1.38\%$	110
6.13. Distribución de la densidad de radiación en el receptor para $N=1, 3, 5$ y 7 espejos parabólicos	112
6.14. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Palma de Mallorca.	115

6.15. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Palma de Mallorca.	116
6.16. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de El Cairo.	117
6.17. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de El Cairo.	118
6.18. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Múnich.	119
6.19. Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Múnich.	120
7.1. Receptor construido para el prototipo CCStaR V0	128
7.2. Reflector construido para el CCStaR V0	129
7.3. a) Imagen durante el proceso de construcción. b) Imagen del prototipo CCStaR V0 ya instalado	129
7.4. Esquema de principio para el ensayo del CCStaR V0	130
7.5. Banco de Ensayos construido en fase laboratorio	131
7.6. Captura de pantalla durante el proceso de medidas experimentales en fase laboratorio	131
7.7. Termistor utilizado en el banco de ensayos	132
7.8. Caudalímetro McMillan modelo 107 <i>FLO – SENSORS</i> utilizado en el banco de ensayos para CCStaR V0	133
7.9. a) Actuador válvula 3-vías <i>SIEMENS</i> ® HVAC SQK34.00 b) Actuador válvula 2-vías <i>CIDIEMME</i> ® <i>E COMPACT RS</i>	133
7.10. a) Piranómetro CM11 K&Z. b) Pirheliómetro CH1 K&Z	134
7.11. Anemómetro modelo IQ-v3.1 de la empresa <i>Quimisur SL</i>	135

7.12. a) Tarjeta 4350NI para la lectura de termistores. b) Tarjeta NIDAQPad-6015 para adquisición y actuadores	135
7.13. Equipos de medida. Banco de ensayos en el exterior	136
7.14. a) Pirheliómetro acoplado a un telescopio para el seguimiento solar. b) Medidores de viento y temperatura ambiente	137
7.15. Ensayo del receptor a temperatura ambiente	137
7.16. Temperaturas medidas durante el ensayo a temperatura ambiente del receptor	139
7.17. Eficiencia óptica medida durante los ensayos	139
7.18. Visualización del <i>ray-tracing</i> en el receptor para el cálculo de la eficiencia óptica en incidencia normal	140
7.19. CCStaR V0 funcionando en condiciones reales	141
7.20. Capturas de pantalla en el proceso de registro de datos y actuación	142
7.21. Potencia teórica mediante simulación y potencia experimental del prototipo CCStaR V0 en condiciones reales de funcionamiento a temperatura ambiente	143
7.22. Visualización gráfica del <i>ray-tracing</i> para el prototipo CCStaR V0. a): Vista frontal. b): Vista general	143
7.23. Eficiencia óptica transversal y longitudinal del prototipo CCStaR V0 y del <i>diseño teórico</i> con valores $N=9$, $F/W=1.50$, y $\gamma=0.94$	145
7.24. Curvas IAM del prototipo CCStaR V0	146
7.25. Distribución local de la densidad de radiación en el receptor del prototipo CCStaR V0	146
7.26. Vista diseño 3D del prototipo CCStaR V1	148
7.27. Prototipo CCStaR V1	148
7.28. Panel reflector del CCStaR V1. Las flechas pequeñas indican la presión que se realiza durante el proceso de curado	149
7.29. a) Molde para la fabricación del panel reflector. b) Imagen de un proceso de desmoldado	150
7.30. Dos de los paneles reflectores (4 parábolas) que forman la superficie reflectora del CCStaR V1	150
7.31. Imagen de los rayos reflejados para una valoración cualitativa de la geometría fabricada. Ángulo de incidencia transversal $\theta_t=30^\circ$	151
7.32. Imagen de la radiación solar reflejada en la zona del receptor	151

7.33. Flujo local de concentración en función de la posición transversal del receptor y fotografías obtenidas mediante la cámara CCD: a) Reflector con defecto de fabricación. b) Reflector sin defecto de fabricación.	153
7.34. Visualización del <i>ray-tracing</i> para el reflector y el tubo receptor del CCStaR V1: a) Incidencia normal. b) $\theta_t = 15^\circ$. c) $\theta_t = 30^\circ$. d) $\theta_t = 45^\circ$	154
7.35. a) Cotas interiores del tubo receptor. b) Cotas longitudinales del tubo receptor en mm	155
7.36. a) Sección del tubo receptor Sydney mostrando la composición de materiales. b) Incremento de temperatura en condiciones estáticas de radiación solar. (Martínez et al., 2008)	156
7.37. Rotura de tubos receptores	157
7.38. Montaje de los tubos receptores y vistas del montaje completado	157
7.39. Desviación en el posicionamiento relativo, horizontal y vertical, de los extremos A y B, entre el tubo receptor y el espejo parabólico	159
7.40. Medición de la posición relativa entre los extremos de los tubos receptores y los espejos parabólicos. Se muestra el extremo B	159
7.41. Medición de la posición relativa horizontal entre los extremos de los tubos receptores. a) Extremo A. b) Extremo B	160
7.42. Medición de la posición relativa horizontal entre tubos receptores extremos y las vigas soporte de los reflectores	160
7.43. a) Medición de la posición relativa horizontal entre reflectores. b) Medición de la posición relativa horizontal entre reflectores extremo y las vigas soporte de los reflectores	160
7.44. Visualización del <i>ray-tracing</i> para el CCStaR V1	163
7.45. Eficiencia óptica transversal y longitudinal del prototipo CCStaR V1 y del <i>diseño teórico</i> con valores $N=1$, $F/W=1.50$ y $C_a=11$	164
7.46. Curvas IAM del prototipo CCStaR V1	164
7.47. Esquema de principio para el ensayo del CCStaR V1	166
7.48. Caudalímetro utilizado en el banco de ensayos para CCStaR V1	167
7.49. a) Equipos de medida. b) Algunos elementos del banco de ensayos (máquina enfriadora, aerotermo, depósito de inercia, vaso de expansión, bomba, válvulas 3V, ...)	167
7.50. Eficiencia óptica experimental y calculada mediante <i>ray-tracing</i>	172

7.51. a) Temperatura de trabajo en el concentrador y b) Diferencia entre temperatura de trabajo y temperatura ambiente para cada punto de medida estable	173
7.52. a) Diferencia entre temperatura de trabajo y temperatura ambiente en función de la irradiación directa en el plano del captador. b) Ángulos transversal y longitudinal para la posición relativa del Sol durante la campaña de ensayos	174
7.53. Potencia experimental <i>vs</i> potencia teórica determinada mediante RLM . . .	176
7.54. Potencia por unidad de superficie experimental y teórica determinada mediante ajuste por RLM para cada punto de medida	176
7.55. Irradiancia directa en el plano del captador para cada punto de medida . . .	177
7.56. Valores que toma el valor experimental $\frac{dT_{av}}{dt}$ para cada punto de medida . . .	177

Índice de Tablas

3.1.	Ancho de los espejos a , altura que toma el concentrador h y semiángulo de apertura ϕ para diferentes parámetros de diseño F/W y N	40
4.1.	Valores climáticos promedio anuales: G_{Hb} irradiancia directa horizontal, G_{Hd} irradiancia difusa horizontal, DNI irradiancia directa normal al Sol, G_T irradiancia total en el plano del captador (plano inclinado 15°), G_{Tb} irradiancia directa en el plano del captador (plano inclinado de 15°), fracción de irradiancia difusa en el plano horizontal, y temperatura ambiente en horas de Sol. . .	53
5.1.	Rango de valores que toma el número de espejos N para diferentes valores de γ y F/W considerando $\sigma_B=8$ mrad y tamaño angular del Sol $CSR=0.05$. .	63
5.2.	Rango de valores que toma la concentración de aperturas C_a para diferentes valores de γ y F/W considerando $\sigma_B=8$ mrad y tamaño angular del Sol $CSR=0.05$	64
5.3.	Efecto en el IAM transversal y en la concentración geométrica si se incrementan los parámetros F/W , N y γ	70
5.4.	Efecto en el IAM longitudinal si se incrementan los parámetros F/W , N y γ	71
5.5.	Valores medios de los estimadores de error para la factorización simple y para la nueva factorización del IAM para 160 casos escogidos al azar	75
5.6.	Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen <i>los</i> 90 casos más eficientes de un total de 163 calculados para $\gamma=0.98$. Clima de Palma de Mallorca. La eficiencia se expresa en %.	87
5.7.	Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 163 calculados para $\gamma=0.98$. Clima de El Cairo. La eficiencia se expresa en %.	88

5.8. Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 163 calculados para $\gamma = 0.98$. Clima de Múnich. La eficiencia se expresa en %.	89
5.9. Energía ganada por unidad de superficie. En todos los casos $\beta_c = 15^\circ$. a): Caso más eficiente del FMSC. b): Colector tubos de vacío tomado como referencia	90
5.10. Valores que toman los parámetros de diseño y los valores promedio de la eficiencia térmica anual para las orientaciones NS y EO y los tres climas considerados. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio $\bar{\eta}$. Se exponen los 42 casos que presentan mayor interés desde el punto de vista de diseño. En todos los casos $\gamma = 0.98$. La eficiencia se expresa en %.	91
6.1. Valores medios de los estimadores de error para la factorización simple y para la nueva factorización del IAM para 160 casos escogidos al azar	109
6.2. Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 792 casos calculados. Clima de Palma de Mallorca. La eficiencia se expresa en %.	121
6.3. Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 792 casos calculados. Clima de El Cairo. La eficiencia se expresa en %.	122
6.4. Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 792 casos calculados. Clima de Múnich. La eficiencia se expresa en %.	123
6.5. Energía ganada por unidad de superficie para una temperatura de trabajo $T_{av} = 200^\circ\text{C}$. En todos los casos $\beta_c = 15^\circ$, y caso más eficiente del CSFMSC para cada clima.	124
6.6. Valores que toman los parámetros de diseño y los valores promedio de la eficiencia térmica anual para las orientaciones NS y EO, y los tres climas considerados. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio $\bar{\eta}$. Se exponen los 42 casos que presentan mayor interés desde el punto de vista eficiente y de diseño. La eficiencia se expresa en %.	125

7.1. Especificaciones CM11	134
7.2. Especificaciones CH1	134
7.3. Especificaciones anemómetro IQ-v3.1	135
7.4. Ubicación y orientación del CCStaR V0. Orientación Sur e inclinación de 15°	141
7.5. Dimensiones del prototipo CCStaR V0	144
7.6. Especificaciones técnicas de la cámara CCD	152
7.7. Error de posicionamiento horizontal entre los tubos receptores y las parábolas	161
7.8. Error de posicionamiento vertical entre los tubos receptores y las parábolas .	162
7.9. Ubicación y orientación del CCStaR V1	168
7.10. Requerimientos para la obtención de puntos fiables a partir de las medidas experimentales	168
7.11. Medidas experimentales e indicadores para la eficiencia óptica	169
7.12. Medidas experimentales e indicadores para la eficiencia óptica (continuación)	170
7.13. Potencia ganada, ángulos solares, irradiancia G_{Tb} , y eficiencia óptica experi- mental y teórica para cada uno de los 45 puntos de medida estables	171
7.14. Potencia ganada, ángulos solares, irradiancia G_{Tb} , y eficiencia óptica experi- mental y teórica para cada uno de los 45 puntos de medida estables (continuación)	172
7.15. Resultados de la RLM considerando los parámetros η_0 , c_1 , c_2 , y c_5 respecto superficie reflectora	175
7.16. Resultados de la RLM considerando los parámetros η_0 , c_2 , y c_5 respecto su- perficie reflectora	175
7.17. Tabla para el análisis ANOVA del factor F de Fisher	178

Nomenclatura

Abreviaciones

CSR Circum Solar Ratio, véase la ecuación (2.29)

EM Electromagnético

FMSC Fixed Mirror Solar Concentrator

IAM Incidence Angle Modifier

MAE Error medio absoluto, véase la ecuación (5.7)

MBE Error medio sesgado, véase la ecuación (5.6)

ME Error medio, véase la ecuación (5.8)

RMSE Raíz cuadrada del error cuadrático medio, véase la ecuación (5.5)

Símbolos matemáticos

a Ancho de los espejos del FMSC

A_a Área de apertura del captador solar

A_r Apertura del receptor

A_s Área de la ventana solar en el *ray-tracing*

c_1 Primer coeficiente de pérdidas térmicas, véase la ecuación (2.49)

c_2 Segundo coeficiente de pérdidas térmicas, véase la ecuación (2.49)

C_a Concentración de aperturas, véase la ecuación (2.51)

C_g Concentración geométrica. Área de apertura entre área de la superficie del absorbedor.

C_p Capacidad térmica

d	Espesor del vidrio, véase la ecuación (2.24)
DNI	Irradiancia directa normal al Sol
E_b	Integral anual de la radiación directa incidente sobre la apertura del captador
E_c	Energía que impacta en la apertura del concentrador en el <i>ray-tracing</i>
E_r	Energía que llega al receptor en el <i>ray-tracing</i>
F	Distancia focal del FMSC o CSFMSC
F_{av}	Factor de transferencia de calor, véase la ecuación (2.40)
$F_{CS}(\theta)$	Función distribución de probabilidad para el ángulo de un rayo solar respecto la dirección central en la región de la aureola solar, véase la ecuación (4.4)
$F_D(\theta)$	Función distribución de probabilidad para el ángulo de un rayo solar respecto la dirección central en la región del disco solar, véase la ecuación (4.3)
$f(r)$	Función densidad de probabilidad para la componente radial de un rayo reflejado respecto la reflexión ideal, véase la ecuación (2.18)
$F(r)$	Función distribución de probabilidad para la componente radial de un rayo reflejado respecto la reflexión ideal, véase la ecuación (2.19)
F/W	Cociente entre la distancia focal F y la amplitud del concentrador W . Parámetro de diseño
$f(\theta)$	Función densidad de probabilidad para el ángulo que forma un rayo reflejado respecto la reflexión ideal, véase la ecuación (4.9)
$f(\theta_t, \theta_l)$	Factor de corrección para la aproximación factorizada del IAM, véase la ecuación (5.9)
G_b	Irradiancia solar directa en el plano del captador
G_d	Irradiancia solar difusa en el plano del captador
G_{Hb}	Irradiancia solar directa en el plano horizontal
G_{Hd}	Irradiancia solar difusa en el plano horizontal
G_T	Irradiancia solar total en el plano del captador
G_{Tb}	Irradiancia solar directa en el plano del captador
h	Altura del reflector del FMSC, véase la figura 3.8

- $I(\lambda, T)$ Irradiancia espectral del cuerpo negro, véase la ecuación (2.7)
- I_{CS} Irradiancia de la aureola solar, véase la ecuación (2.34)
- I_D Irradiancia del disco solar, véase la ecuación (2.35)
- J Irradiancia, véase la ecuación (2.5)
- J_a Irradiancia en la apertura del captador solar
- J_r Irradiancia en la apertura del receptor
- $(K_{\tau\alpha})_b$ Modificador de ángulo para la radiación directa respecto a la apertura del captador = K , véase la ecuación (2.46)
- k Coeficiente de extinción en el medio, véase la ecuación (2.6)
- $(K_{\tau\alpha})_l$ Modificador de ángulo longitudinal respecto a la apertura del captador = K_l , véase la ecuación (2.48)
- $(K_{\tau\alpha})_t$ Modificador de ángulo transversal respecto a la apertura del captador = K_t , véase la ecuación (2.48)
- L Longitud axial del FMSC
- L_α Matriz de rotación alrededor del eje longitudinal, véase la ecuación (4.17)
- L_β Matriz de rotación alrededor del eje transversal, véase la ecuación (4.18)
- L_γ Matriz de rotación alrededor del eje vertical, véase la ecuación (4.16)
- $L_{\beta\alpha\gamma}$ Matriz global de rotación, véase la ecuación (4.19)
- N Número de espejos que forma el FMSC o el CSFMSC. Parámetro de diseño
- n_1 Coeficiente de refracción del primer material, véase la Figura 2.2
- n_2 Coeficiente de refracción del segundo material, véase la Figura 2.2
- n_I Parte imaginaria del índice de refracción complejo, véase la ecuación (2.4)
- n_R Parte real del índice de refracción complejo, véase la ecuación (2.4)
- n_{λ_0} Coeficiente de refracción de una capa fina antirreflectante, véase la ecuación (2.26)
- $N(\lambda)$ Índice de refracción complejo del medio, véase la ecuación (2.4)
- P Potencia radiada por unidad de superficie [W/m^2], véase la ecuación (2.8)

$Q_{g,a}$	Energía anual capturada por el FMSC, véase la ecuación (5.10)
\dot{Q}_g	Potencia ganada del captador solar, véase la ecuación (2.40)
\dot{Q}_u	Potencia útil del captador solar, véase la ecuación (2.36)
r	Componente radial, véase la Figura 2.3
R	Radio del círculo generatriz del FMSC o del CSFMSC
S	Energía absorbida en la placa absorbedora por unidad de tiempo y superficie de apertura, véase la ecuación (2.36)
T	Temperatura [K]
T_a	Temperatura ambiente
T_{av}	Media aritmética de las temperaturas en la entrada y en la salida del fluido en un captador solar
T_i	Temperatura de entrada en el captador
T_{ma}	Temperatura media de la placa absorbedora
T_o	Temperatura de salida en el captador
u	Unidad de longitud considerada $W = 1u$
U_L	Coeficiente global de pérdidas, véase la ecuación (2.36)
\hat{u}	Variable aleatoria en el intervalo (0,1)
\dot{V}	Caudal volumétrico
\dot{V}	Caudal volumétrico
\vec{v}	Vector del rayo reflejado de forma ideal
\vec{v}'	Vector del rayo dispersado
W	Amplitud del FMSC o del CSFMSC $W = 1u$
x_i	Coordenada x del espejo i , véase la ecuación (3.2)
z_i	Coordenada z del espejo i , véase la ecuación (3.2)

Símbolos griegos

α	Absortancia
α_0	Absortancia en incidencia normal
α_c	Ángulo de rotación alrededor del eje longitudinal para la orientación del concentrador, véase la Figura 4.6
β_c	Ángulo de rotación alrededor del eje transversal para la orientación del concentrador, véase la Figura 4.6
γ	Factor de intercepción, véase la ecuación (2.57)
γ_c	Ángulo de rotación alrededor del eje vertical para la orientación del concentrador, véase la Figura 4.6
γ_b	Coefficiente del perfil radial de la radiación solar, véase la ecuación (2.31)
γ_c	Ángulo de inclinación del captador solar
δ	Densidad del fluido caloportador
ΔK	Error de la aproximación factorizada del IAM respecto al valor teórico, véase la ecuación (5.4)
ϵ	Emitancia, véase la ecuación (2.9)
ε	Energía de un rayo en el <i>ray-tracing</i>
η	Eficiencia térmica instantánea del captador, véase la ecuación (2.41)
$\bar{\eta}$	Eficiencia promedio de las orientaciones NS y EO para las tres localidades consideradas
η_B	Eficiencia del concentrador respecto radiación directa en el plano del captador, véase la ecuación (2.59)
$\eta_{b,a}$	Eficiencia anual respecto radiación directa en la apertura del FMSC, véase la ecuación (5.11)
$\bar{\eta}_{b,a}$	Eficiencia promedio de las orientaciones NS y EO para una localidad
$\eta_{opt}(\theta_t, \theta_l)$	Eficiencia óptica calculada mediante <i>ray-tracing</i> , véase la ecuación (4.15)
η_T	Eficiencia del concentrador respecto radiación total en el plano del captador, véase la ecuación (2.58)
η_0	Eficiencia del captador solar en incidencia normal a temperatura ambiente
θ	Ángulo desviado respecto la dirección principal

θ_{ap}	Apertura angular del concentrador solar
θ_f	Ángulo para la posición del receptor, véase la figura 3.9
$\theta_{f,LIM}$	Ángulo límite donde el receptor intersecciona con el reflector
θ_i	Ángulo de incidencia de un rayo sobre una superficie, véase la Figura 2.2
θ_l	Ángulo longitudinal, véase la Figura 2.6
θ_r	Ángulo del rayo reflejado, véase la Figura 2.2
θ_s	Tamaño angular aparente de la fuente
θ_t	Ángulo transversal, véase la Figura 2.6
$\theta_{t,LIM}$	Ángulo de incidencia transversal límite donde el receptor intersecciona con el reflector
θ_{tr}	Ángulo del rayo refractado, véase la Figura 2.2
Θ_{cs}	Ángulo zenital solar respecto al captador solar, véase la Figura 2.6
Θ_s	Ángulo zenital solar
κ	Coeficiente del perfil radial de la radiación solar, véase la ecuación (2.32)
λ	Longitud de onda de la onda EM
λ_0	Longitud de onda de una onda EM sobre una capa fina antirreflectante, véase la ecuación (2.25)
ρ	Reflectancia
$\rho_{2\pi}$	Reflectancia hemisférica
σ_a	Desviación estándar del error en la alineación de los espejos, véase la ecuación (5.1)
σ_B	Desviación estándar combinando todos los errores ópticos especulares, véase la ecuación (2.21)
σ_i	Desviación estándar de la fuente de error especular i , véase la ecuación (2.21)
σ_m	Desviación estándar del error debido a la no especularidad por efectos microscópicos, véase la ecuación (5.1)
σ_s	Desviación estándar del error en la inclinación de los espejos, véase la ecuación (5.1)

σ_t	Desviación estándar del error debido al mecanismo de seguimiento solar, véase la ecuación (5.1)
τ	Transmitancia
τ_a	Transmitancia debida a los efectos de la absorptividad, véase la ecuación (2.23)
τ_r	Transmitancia debida a los efectos de reflexión, véase la ecuación (2.23)
χ	$\chi = CSR$, véase la ecuación (2.33)
ϕ	Semiángulo de apertura del concentrador solar, véase la Figura 3.8
Φ_{cs}	Ángulo azimutal solar respecto al captador solar, véase la Figura 2.6
Φ_s	Ángulo azimutal solar
$\phi(\theta)$	Perfil radial de la energía solar por estereorradián, véase la ecuación (2.30)
φ_i	Ángulo de inclinación del espejo i , véase la ecuación (3.3)

Capítulo 1

Introducción

En este primer Capítulo de la Tesis Doctoral se tratan los temas que dieron origen a las motivaciones del trabajo aquí presentado. Aspectos como el cambio climático provocado por el modelo energético mundial, y el potencial de la energía solar térmica, son expuestos en este Capítulo. Se describen también los concentradores solares térmicos más comunes. Por último se expone la estructura de la Tesis Doctoral por Capítulos, y se definen los objetivos.

1.1. Necesidad de un cambio en el modelo energético

Comunicado de Prensa. Bruselas, 6 de abril de 2007:

En la presentación de la evaluación sobre los impactos presentes y futuros del cambio climático realizada por el Grupo intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), el máximo dignatario de las Naciones Unidas en el terreno del cambio climático ha señalado el posible peligro de que el cambio climático desencadene conflictos por el agua, la propagación de enfermedades, y un aumento de la migración mundial, a no ser que se adopten medidas adecuadas de adaptación y se integren en la planificación del desarrollo a largo plazo.

"Estos impactos previstos nos demuestran que necesitamos urgentemente llegar a un acuerdo sobre la intervención internacional futura para combatir el cambio climático, y buscar medios eficaces para generar los fondos necesarios para la adaptación", ha declarado el Secretario Ejecutivo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Ivo de Boer.

El consumo energético en los países industrializados ha sufrido un aumento exponencial a lo largo de los últimos dos siglos. La principal fuente de energía proviene de los combustibles fósiles, y el uso de estas fuentes provoca emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera. La concentración atmosférica de CO_2 global ha aumentado de 280 ppm (valor preindustrial) a 396 ppm en Abril 2012 (valor medido en *Mauna Loa Observatory*, Hawai).

De acuerdo con el actual consenso científico, el efecto invernadero se está viendo acentuado en la Tierra por la emisión de gases como el dióxido de carbono y el metano debido a la actividad económica humana. Una de las consecuencias de este efecto es un aumento global de las temperaturas provocando así un cambio climático inevitable en nuestra era (IPCC, 2007).

Durante el año 2009 el consumo energético mundial alcanzó una cifra superior a 12000 MTpe, que supone más del doble a lo consumido en 1973, ver la Figura 1.1 reportada por la Agencia Internacional de la Energía (IEA). En cuanto a porcentajes, los combustibles fósiles representan el 81 % del consumo mundial, y las fuentes de energía renovables como geotérmica, eólica, y solar, no llegan a tener el 1 % en el cómputo total, ver Figura 1.2

Observar un cambio en el clima de la Tierra precisa de varios años de observación en múltiples puntos del planeta para detectar tales efectos. En la actualidad se conoce con un elevado grado de certeza que algunos de estos efectos son (Sims, 2004):

- Los niveles de CO_2 han aumentado en un 28 % en los últimos 150 años, y los de CH_4 se han duplicado
- La temperatura superficial media ha aumentado entre 0.4-0.8°C en el último siglo sobre la media de 14°C
- Los días con presencia de heladas han disminuido durante el último siglo
- Las precipitaciones han aumentado entre un 5-10 % en el hemisferio Norte, sin embargo han disminuido en las zonas secas
- Las inundaciones por precipitaciones ocurren más frecuentemente en medias y altas altitudes
- El nivel medio del mar ha aumentado entre uno y dos mm por año en el último siglo
- El hielo del mar Ártico durante los veranos presenta entre un 10-15 % menos extensión desde 1950
- Los glaciares han disminuido en extensión un 10 % desde 1960
- El fenómeno “El niño” de cada vez ocurre con más frecuencia, persistencia, e intensidad
- Se observan desplazamientos de plantas, insectos, pájaros, y peces hacia altas latitudes

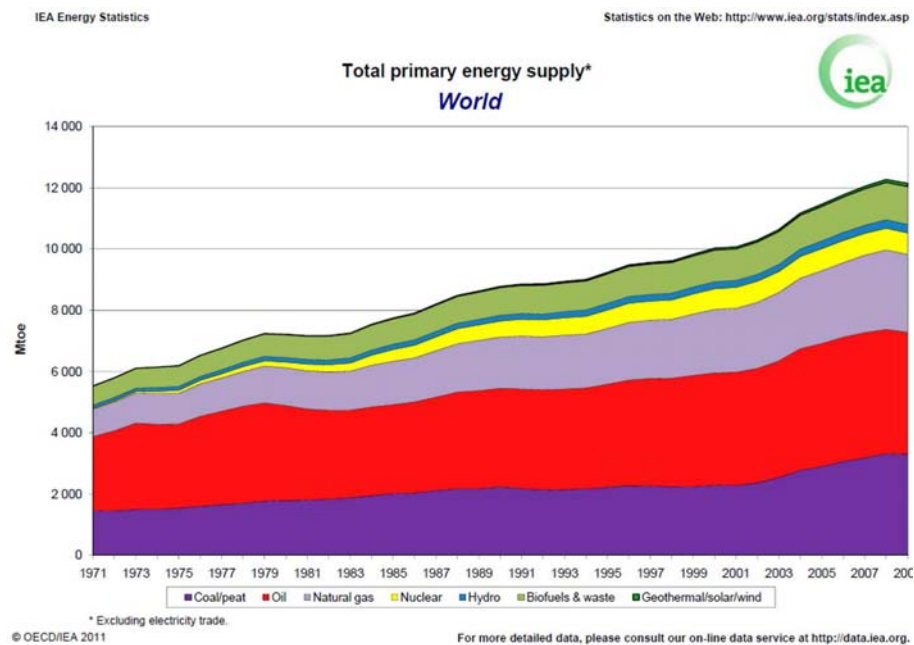


Figura 1.1: Evolución de las fuentes de energía primaria utilizada entre 1973 y 2009. Fuente IEA

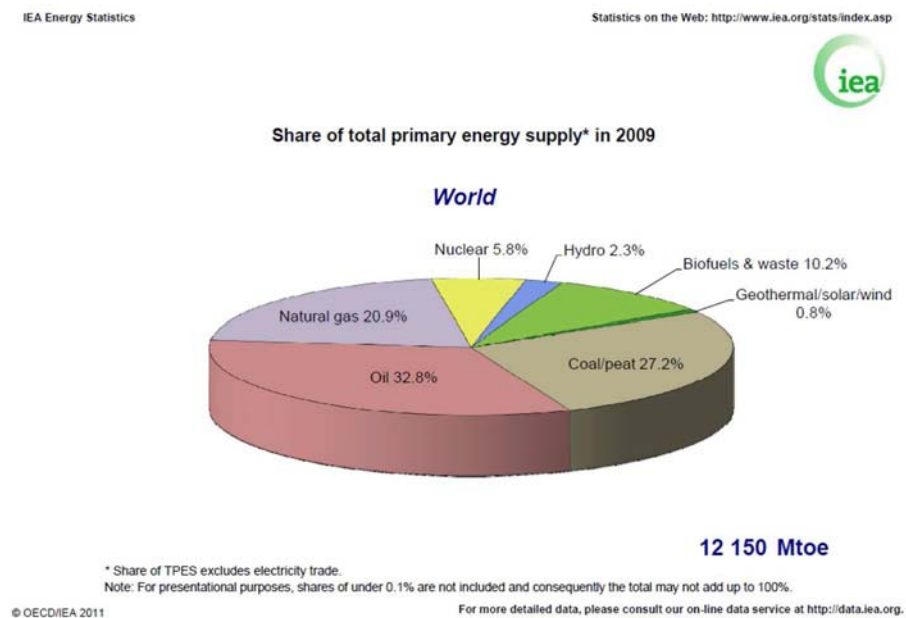


Figura 1.2: Porcentajes globales de fuente de energía primaria utilizada en 2009. Fuente IEA

Suponiendo el más optimista de los escenarios en el que “mañana” se dejara de emitir CO₂, el cambio climático continuaría desarrollándose. Algunos estudios estiman que para mantener los niveles de concentración de CO₂ en 450 ppm, valor máximo para adaptarse de una manera no demasiado traumática al cambio del clima, debería alcanzarse el pico de emisiones entre los próximos 3-13 años (Sims, 2004).

Disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero pasa, principalmente, por tres alternativas (no excluyentes). La primera, y más evidente, radica en reducir el consumo energético, la segunda en hacer un uso racional de la energía, y por último utilizar fuentes de energía libres de emisiones de efecto invernadero.

La comunidad internacional necesita ahora aceptar que la ciencia, con sus incertidumbres, está demostrando que la humanidad tiene un grave problema que solventar. El Protocolo de Kyoto, y el Tratado Climático de Copenhague, son ejemplos donde se tratan medidas para reducir a nivel mundial las emisiones. En la actualidad estos temas son tratados internacionalmente, y parece que los países son más conscientes mostrando firmes intenciones para solucionarlo. Sin embargo, si estas intenciones no van seguidas de medidas y actuaciones políticas para facilitar el cambio de modelo energético a las empresas y consumidores, no se lograrán tales objetivos.

Sin duda, la importancia de desarrollar proyectos que utilicen como fuente primaria la energía solar tiene un papel muy importante para la conservación global del planeta.

1.2. La energía solar térmica en Europa

La mitad de la energía que se consume en Europa es utilizada para procesos de calor, ver Figura (1.3). En el 80 % de estos casos se trata de aplicaciones que necesitan una temperatura inferior a 250°C (Bokhoven et al., 2006). Por otro lado, el Sur de Europa tiene unas excelentes condiciones de radiación solar, y por consiguiente este calor podría ser generado mediante tecnología solar térmica. El estudio realizado por Weiss and Biermayr (2009) demuestra que existe un gran potencial de la energía solar térmica en Europa.

La implantación de esta tecnología está en continuo crecimiento. A finales del 2007 la capacidad térmica de captadores solares (captadores planos y colectores de tubos de vacío) instalada en Europa alcanzó los 15.3 GW_t, correspondiendo a 21.9 millones de metros cuadrados de captación. En este contexto, es remarcable que el 70 % de la capacidad instalada se encuentran en Austria, Alemania, y Grecia. La mayor parte de la potencia instalada es utilizada para calentamiento de agua sanitaria, calentamiento de piscinas, y calefacción. Procesos en los cuales la temperatura de trabajo no supera los 60°C (Weiss and Biermayr, 2009).

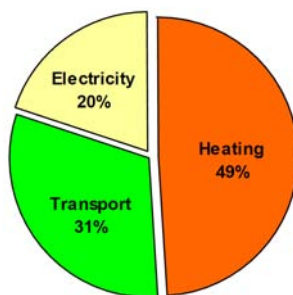


Figura 1.3: Desglose del uso final de la energía en Europa. Fuente: *European Solar Thermal Technology Platform* (Bokhoven et al., 2006)

Por otro lado, existe una gran demanda energética en el sector industrial que se podría cubrir con energía solar térmica. Se confirma una tendencia general en todos los estudios recientes de que alrededor del 50 % de la demanda de calor industrial se realiza a temperaturas en la gama baja ($<60^{\circ}\text{C}$), media (60°C – 150°C) y media-alta (150°C – 250°C) (Schweiger et al., 2000). La industria textil y alimentaria son claros ejemplos.

Otro sector en la gama media de temperatura, es el de generación de frío mediante máquinas de absorción de doble efecto. Se estima que, en el Sur de Europa y en áreas turísticas del Mediterráneo, podría suponer un ahorro de entre el 40-50 % de energía primaria en este sector (Balarasa et al., 2007).

La generación de electricidad con turbinas orgánicas de ciclo Rankine (ORC), y desalinización de agua, también son potenciales usuarios de energía solar térmica en el rango de media y media-alta temperatura.

Por el momento todos estos sectores no encuentran como alternativa energética la energía solar térmica. Esto se debe principalmente por dos motivos:

1. Si bien se encuentra en el mercado captadores solares planos con excelentes rendimientos para temperaturas inferiores a 60°C , estos mismos no lo son tanto cuando la temperatura de trabajo excede este umbral. Cuando esto ocurre deben instalarse más captadores, o bien se recomienda otro tipo de sistemas (i.e. tubos de vacío, cilindro-parabólicos, reflectores Fresnel,...) que sí son eficientes a estas temperaturas. En cualquier caso el coste es mayor.
2. El segundo problema que se encuentra es lo que se denomina “la integrabilidad en edificaciones”. Debido al aumento del precio del suelo, en la mayoría de los casos el único espacio disponible para ubicar los captadores es el que se dispone en las cubiertas de los edificios. Pero si no se dispone de un captador solar de fácil adaptabilidad en cubiertas, hace a menudo inviable su instalación. Los captadores tipo cilindro-parabólicos y Fresnel presentan complicaciones a la hora de instalarse en cubiertas.

A pesar de todo, la energía solar térmica en Europa vive un álgido momento, y las perspectivas son muy ambiciosas. La Federación Europea Solar Térmica de la Industria (ESTIF) presenta un escenario en el cual estima que para el año 2020, si se siguen las medidas oportunas, es posible la instalación en Europa de tantos metros cuadrados de paneles solares térmicos como ciudadanos europeos, lo que implica una potencia instalada de 320 GW_t.

La Agencia Internacional de la Energía, mediante el programa *Solar Heating and Cooling*, está llevando a cabo varias tareas para analizar los captadores solares más adecuados con aplicaciones en temperaturas superiores a los 100°C. Los resultados del concentrador solar que se exponen en la Tesis Doctoral han sido presentados en las últimas fases de la *Task 33* (Weiss and M., 2008), y actualmente en la *Task 49* de dicho programa.

En cuanto a España, después de varios años de un crecimiento modesto, las ordenanzas están teniendo un impacto muy positivo en el mercado solar. El Código Técnico de la Edificación (CTE) obliga la instalación de paneles solares térmicos en todos los edificios de nueva construcción para abastecimiento de agua caliente sanitaria. Por otro lado, se espera un aumento en el sector industrial y turístico gracias a las buenas condiciones de radiación que presenta el país.

1.3. Concentradores solares térmicos

Los concentradores solares térmicos son dispositivos que concentran la radiación solar incidente hacia un receptor. Reducir el tamaño del absorbedor, sin perder superficie de captación, permite reducir las pérdidas térmicas del captador. Los captadores con concentración tienen la ventaja de poder llegar a temperaturas más altas, pero dependiendo del caso, estos dispositivos desaprovechan el total de la radiación difusa. Otro inconveniente es que el rendimiento óptico disminuye, ya que el elemento óptico que se utiliza para concentrar la energía no es ideal.

Existe una gran diversidad de concentradores solares, estos pueden ser reflectores o refractores, de concentración lineal o puntual, y pueden estar formados por varios segmentos o formar una superficie continua. Los receptores pueden ser convexos, planos o cóncavos, y pueden estar evacuados o no. Además, según el tipo de concentrador, existe un modo de seguimiento solar. El factor de concentración puede variar en varios órdenes de magnitud, de poco más de uno a más de mil.

Con esta gran variedad de diseños es difícil desarrollar un método general de análisis aplicable a todos los concentradores. Aún así en la literatura más extendida (Duffie and Beckman, 1991) se clasifican en tres grupos: concentrador lineal sin imagen de baja concentración, concentrador lineal de imagen de media concentración, y concentrador 3D de alta concentración. Otros autores clasifican los concentradores solares según el método óptico utilizado para generar el reflector, o según el nivel de concentración (ISES, 2001). A continuación se

mencionan, desde un punto de vista introductorio, los concentradores solares térmicos más comunes y extendidos.

Un ejemplo de concentrador lineal sin imagen de baja concentración es el llamado CPC (*Compound Parabolic Concentrator*). Consiste en la composición de dos parábolas de tal manera que toda la radiación incidente, perteneciendo a un cierto rango de ángulos de incidencia, impacta en el receptor. El factor de concentración geométrica está por debajo de cinco. Estos concentradores encuentran su mayor aplicabilidad para suministrar calor en condiciones extremas, como sistemas de calefacción en países nórdicos, y aplicaciones hasta 100°C, (ISES, 2001; Weiss and M., 2008).

Un caso muy estudiado de concentrador lineal de imagen es el llamado captador solar cilindro-parabólico. Hasta hace pocos años únicamente se encontraba aplicabilidad para grandes plantas de generación de electricidad (centrales termoeléctricas), pero en los últimos años versiones de tamaño reducido están siendo analizadas para suministrar calor a temperaturas de gama media y media-alta. Estos cilindro-parabólicos de pequeño tamaño están pensados para ser instalados en cubiertas de edificios (Rojas et al., 2006; Hoffschmidt et al., 2006), ver Figura 1.4. El factor de concentración de los cilindro-parabólicos oscila entre 15 y 100. Los autores Fernández et al. (2010a) presentan una visión general de los colectores cilindro-parabólicos que se han construido y comercializado durante el siglo pasado, así como los prototipos que se están desarrollando en la actualidad, y sus aplicaciones.

Otro ejemplo de concentrador lineal de imagen es el llamado colector Fresnel. El reflector está formado por un conjunto de segmentos que reflejan la radiación solar hacia un foco. Estos espejos se mueven en función de la posición del Sol, ver la Figura 1.5. Son utilizados para generación de electricidad, y también para procesos de media-alta temperatura (Weiss and Rom, 2005; Weiss and M., 2008). Recientes estudios analizan la integración arquitectónica de reflectores tipo Fresnel en fachadas para la generación de frío solar, (Chemisana et al., 2012).

Tanto los concentradores cilindro-parabólicos, como los de tipo Fresnel, precisan de un movimiento continuado del reflector para el seguimiento solar.

El último gran grupo de concentradores solares son los concentradores 3D. Fundamentalmente existen dos tipos. El llamado *solar dish concentrator*, que está formado por un paraboloide que concentra la luz en un punto. En el foco se ubica un motor Stirling para generación de electricidad. El segundo tipo consiste en un campo de espejos, helióstatos, que reflejan la luz a un mismo punto situado en una torre, llamada torre central.

Con esta tecnología puede llegarse a concentraciones de hasta 10000 veces la radiación solar. A parte de ser utilizados para la generación de electricidad, también se encuentran ejemplos como hornos solares, y procesos químicos de altas temperaturas. Algunos de estos ejemplos se muestran en la Figura 1.6.



Figura 1.4: Concentrador cilindro-parabólico de pequeñas dimensiones CAPSOL-2. Plataforma Solar de Almería (Fernández et al., 2010b)

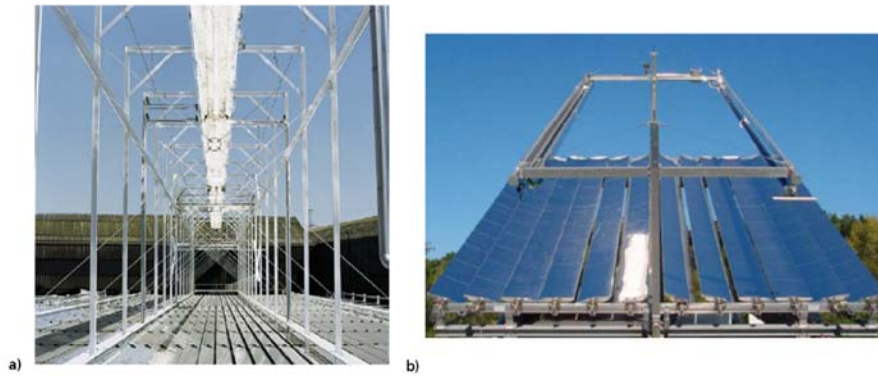


Figura 1.5: a): Fotografía del *Linear concentrating Fresnel reflector*. *Fraunhofer ISE* y *DLR Institute for Technical Thermodynamics*. b): Fotografía del prototipo *Fix-Focus-Trough*. Ubicado en la plataforma de ensayos del *DLR*, Köln. (Weiss and Rom, 2005)

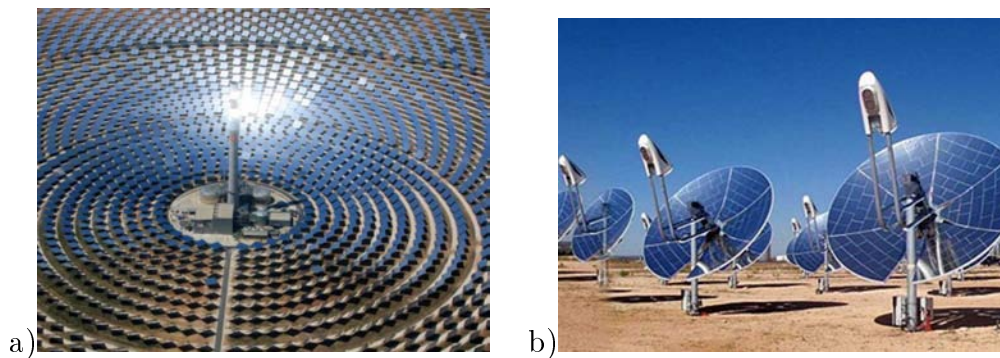


Figura 1.6: a): Central termoeléctrica de torre central (Torresol Energy, Sevilla). b): Central termoeléctrica de discos parabólicos con motores Stirling (Renovalia/Infinia, Albacete)

1.4. Estructura y objetivos de la Tesis Doctoral

Esta Tesis Doctoral está centrada en determinar el comportamiento, tanto óptico como térmico, de dos geometrías muy poco estudiadas. Las geometrías analizadas son: *Fixed Mirror Solar Concentrator* (FMSC), y su variante con espejos curvos *Curved Slats Fixed Mirror Solar Concentrator* (CSFMSC).

Ambos diseños son concentradores lineales de imagen, y dependiendo del caso de baja y media concentración. La principal característica de estos diseños es que el reflector permanece fijo, mientras que el receptor es la única parte móvil del captador. La trayectoria que describe el receptor es circular.

A continuación se exponen los objetivos y los contenidos más relevantes distribuidos por Capítulos. Los primeros seis Capítulos son de carácter teórico, mientras que el Capítulo 7 es de carácter experimental. Todos los Capítulos presentan un apartado de conclusiones (a excepción de los Capítulos 1 y 2). Esto se ha hecho así por presentar una cierta independencia entre ellos. No obstante, en el Capítulo 8 aparecen las conclusiones más relevantes a modo de resumen.

1.4.1. Objetivos

Los objetivos de la Tesis Doctoral son:

1. Definición de la geometría FMSC y CSFMSC mediante parámetros de diseño
2. Desarrollo de una herramienta de trazado de rayos (*ray-tracing*) para la caracterización óptica de concentradores solares
3. Determinación del comportamiento óptico y térmico del FMSC
4. Determinación del comportamiento óptico y térmico del CSFMSC
5. Realización de ensayos experimentales con prototipos para la validación experimental del modelo *ray-tracing* desarrollado
6. Caracterización óptica y térmica de los prototipos ensayados

1.4.2. Contenidos de la Tesis Doctoral

Capítulo 1: En este Capítulo se expone el modelo energético actual y sus impactos en el clima global, el potencial de la energía solar térmica en Europa, y una breve descripción de los concentradores solares térmicos. Los objetivos y estructura de la tesis son expuestos en último término.

Capítulo 2: Se ha expuesto un marco teórico, donde aparecen las ecuaciones físicas más relevantes para comprender el comportamiento óptico y térmico de los captadores solares.

Capítulo 3: En este Capítulo se han mencionado los estudios previos de la geometría FMSC. La geometría del FMSC es definida mediante parámetros de diseño con la finalidad de realizar un análisis paramétrico en el Capítulo 5.

Capítulo 4: En este Capítulo se ha descrito la herramienta de cálculo desarrollada (*ray-tracing*) para la caracterización óptica de concentradores solares. También se han expuesto tres climas, a diferentes latitudes, para determinar la eficiencia térmica anual de las geometrías analizadas. Se expone la metodología utilizada de cálculo.

Capítulo 5: El análisis del FMSC es presentado en este Capítulo. Se han expuesto resultados numéricos sobre la eficiencia óptica en incidencia normal, las curvas del modificador de ángulo (IAM), la factorización biaxial del IAM, la distribución de energía en el receptor, y la eficiencia térmica anual. Se realiza un análisis paramétrico en función de los parámetros de diseño.

Capítulo 6: Con la finalidad de simplificar la geometría del reflector y aumentar la eficiencia térmica respecto al FMSC, en el Capítulo 6 se ha analizado el CSFMSC. Se ha realizado un análisis paramétrico similar al presentado en el Capítulo 5 para el FMSC.

Capítulo 7: Se han expuesto los ensayos experimentales de dos prototipos, uno basado en el FMSC, y el otro en el CSFMSC. La herramienta de cálculo desarrollada (*ray-tracing*) ha sido validada con datos experimentales. Se ha presentado un método para la caracterización térmica de concentradores solares complejos con un IAM biaxial.

Capítulo 8: Conclusiones finales.

Capítulo 2

Marco teórico

La finalidad de este Capítulo es la exposición de una base teórica para facilitar la comprensión de los fundamentos físicos utilizados en el comportamiento de los captadores solares térmicos, así como disponer de la nomenclatura y expresiones utilizadas en Capítulos posteriores.

2.1. Ondas electromagnéticas

Las ecuaciones de Maxwell describen el comportamiento de los campos eléctricos (\mathbf{E}) y magnéticos (\mathbf{B}) en presencia de cargas y corrientes eléctricas. A partir de estas ecuaciones, eliminando los términos de carga y corrientes, se llega a dos expresiones vectoriales conocidas como ecuaciones de ondas que gobiernan el comportamiento de las ondas electromagnéticas (EM) en el vacío:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

Una solución de estas ecuaciones para el campo \mathbf{E} de una onda EM propagándose en un medio homogéneo con índice de refracción N viene dada por la función:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{iw\left(t - \frac{N\vec{x}\vec{s}}{c}\right)} \quad (2.3)$$

donde \mathbf{E}_0 es el vector amplitud de onda, w es la frecuencia angular, t el tiempo, \vec{x} es el vector posición, \vec{s} el vector unitario en la dirección de propagación de la onda, y N es el índice de refracción complejo de dicho medio que depende de la longitud de onda. El índice de refracción complejo se puede descomponer en parte real y parte imaginaria:

$$N(\lambda) = n_R(\lambda) + in_I(\lambda) \quad (2.4)$$

donde λ es la longitud de onda, y n_R y n_I son valores reales. Estos dos valores reales corresponden al índice de refracción del medio (cociente entre la velocidad de propagación de la onda en el vacío y la velocidad de la onda en el medio que se propaga), y la atenuación de la amplitud de onda en dicho medio respectivamente.

Las ondas EM transportan energía. Se define irradiancia, o flujo de radiación, a la energía que atraviesa una superficie imaginaria por unidad de área y por unidad de tiempo. La irradiancia de una onda EM es proporcional al campo eléctrico al cuadrado:

$$J = c\epsilon_0 \|\mathbf{E}^2\| = \frac{c\epsilon_0}{2} E_0^2 \quad (2.5)$$

donde $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} F/m$ es la permitividad en el vacío. Así pues, aplicando la expresión (2.3) a la ecuación (2.5), y definiendo el factor de extinción como $k = 2n_I w/c$, la irradiancia de una onda después de atravesar una distancia d en un medio isotrópico viene dada por:

$$J(d) = J_0 e^{-kd} \quad (2.6)$$

Por consiguiente, si el medio que atraviesa la onda posee un índice de refracción $N(\lambda)$ con parte compleja, la onda se atenúa y pierde parte de la energía que transportaba.

2.2. Radiación de cuerpo negro

Toda materia a una temperatura T emite radiación EM, es lo que se conoce como radiación de cuerpo negro. Un cuerpo con una superficie tal que absorbe toda la radiación EM que incide sobre él se denomina cuerpo negro.

La radiación espectral por unidad de área y por longitud de onda de un cuerpo negro a temperatura T viene dada por la ley de Planck:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B T} - 1)} \quad (2.7)$$

donde $h = 6,626 \times 10^{-34} J.s$ es la constante de Planck y $k_B = 1,38 \times 10^{-23} J/K$ la constante de Boltzmann. La Figura 2.2 muestra la emisión espectral de cuerpo negro a diferentes temperaturas. Se puede observar que cuanto más alta es la temperatura del cuerpo negro el pico de la función se sitúa a longitudes de onda más cortas. Se conoce como ley de Wien a la expresión que relaciona la longitud de onda cuando la radiación es máxima en función de la temperatura absoluta del cuerpo negro, el valor que toma la longitud de onda en el pico de la función: $\lambda_m T_m = 2,898 \times 10^6 nmK$.

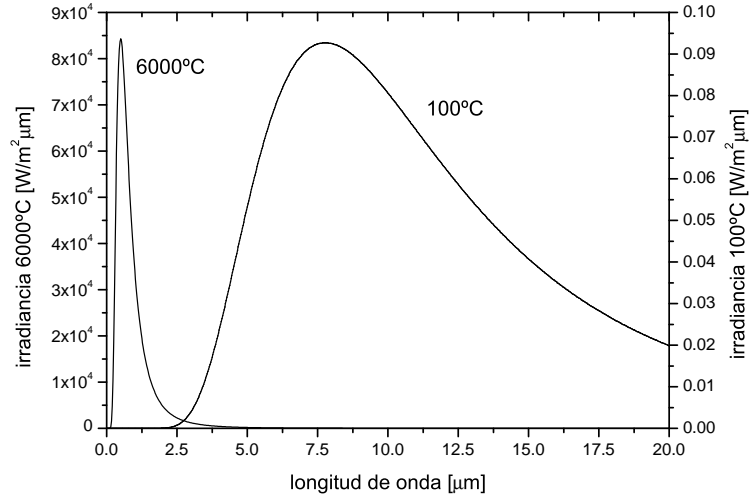


Figura 2.1: Radiación de cuerpo negro para 6000°C y 100°C. Notar las diferentes escalas en los ejes

La potencia radiada por unidad de superficie de un cuerpo negro viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann, y se calcula integrando la ecuación (2.7):

$$P = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.8)$$

donde $\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \times 10^{-8} \frac{J}{sm^2 K}$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

La emitancia de un cuerpo $\epsilon(\lambda, T)$ se define como el cociente entre la radiación emitida por dicho cuerpo a una temperatura T y longitud de onda λ y la radiación de cuerpo negro a la misma temperatura y misma longitud de onda. Por definición, la emitancia de un cuerpo negro es la unidad. Para todos los otros casos $0 < \epsilon < 1$, y la potencia radiada en este caso viene dada por:

$$P = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.9)$$

donde ϵ es la emitancia media en todo el espectro EM.

2.3. Propiedades ópticas de los materiales

Conocer las propiedades ópticas de los materiales utilizados en los captadores solares es esencial para optimizar la captura de la energía solar disponible. Cuando la radiación EM

incide sobre un material esta puede reflejarse, transmitirse o absorberse. La reflectancia ρ , transmitancia τ , y absortancia α , de un material definen las fracciones de probabilidad de los diferentes caminos que puede sufrir la radiación al impactar sobre una superficie. La primera ley de la termodinámica establece que la suma de estas tres fracciones para una longitud de onda determinada debe ser la unidad, ley de conservación de la energía $\rho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1$. La ley de Kirchhoff, nuevamente aplicando la ley de conservación de la energía, viene dada por la equivalencia entre emitancia y absortancia $\epsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$.

Se ha tomado como referencia el libro (Hecht and Zajac, 1986) para las expresiones de óptica EM que se exponen en las siguientes Secciones.

2.3.1. Reflectancia

Cuando la luz incide en la interfase que separa dos materiales, esta puede ser reflejada o refractada. Desde el punto de vista de la óptica geométrica, el ángulo reflejado es igual al ángulo de incidencia, ecuación (2.10), ley de la reflexión. Por otra parte, el rayo refractado cumple la ley de Snell, ecuación (2.11). Los rayos incidente, reflejado y refractado pertenecen al mismo plano (1ª ley básica de la reflexión y de la refracción), ver la Figura 2.2 para la definición geométrica de los ángulos.

$$\theta_r = \theta_i \quad (2.10)$$

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_{tr}) \quad (2.11)$$

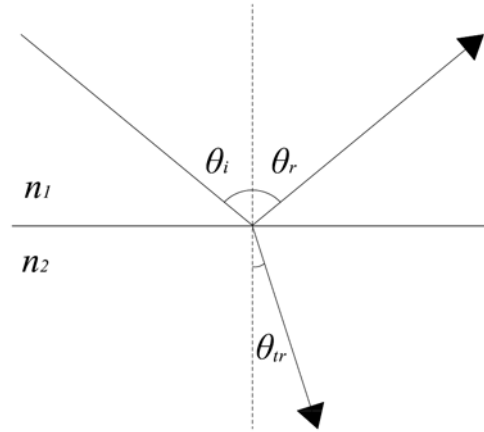


Figura 2.2: Visualización de las leyes básicas de la reflexión y de la refracción

La luz puede estar polarizada en dirección paralela o perpendicular al plano de incidencia. Las ecuaciones de Fresnel relacionan las amplitudes de las ondas reflejada y transmitida (refractada) en una interfase. En el caso de la onda reflejada las amplitudes vienen dadas

por las Ecuaciones (2.12) y (2.13). Los valores medibles de las fracciones reflejadas y transmitidas en una interfase, ρ y τ , están relacionadas con las amplitudes de onda, Ecuaciones (2.14) y (2.15).

$$r_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_{tr})}{\sin(\theta_i + \theta_{tr})} \quad (2.12)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_{tr})}{\tan(\theta_i + \theta_{tr})} \quad (2.13)$$

$$\rho = \frac{1}{2} (r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2) \quad (2.14)$$

$$\tau = 1 - \rho \quad (2.15)$$

A partir de la ley de Snell, ecuación (2.11), el ángulo transmitido depende de los índices de refracción (n_1 y n_2), que a su vez dependen de la longitud de onda. Luego todas estas expresiones dependen de la longitud de onda aunque por simplicidad no se haya escrito de manera explícita.

Las ecuaciones de Fresnel son deducidas asumiendo que las ondas EM se propagan en un material homogéneo de dimensiones superiores a la longitud de onda. Entonces la óptica descrita en este apartado es aplicable al rango de radiación solar siempre y cuando las distancias típicas entre interfases supere ampliamente las longitudes de onda del espectro solar (290-2500 nm).

En la práctica los materiales utilizados para construir espejos no son reflectores ideales. Las imperfecciones a nivel microscópico provocan una pérdida de la calidad especular. Los rayos son dispersados de su dirección ideal un ángulo θ . A partir de resultados experimentales elaborados en los años setenta (Pettit, 1977) se concluyó que una buena aproximación de esta dispersión angular viene dada por una función tipo Gaussiana, ecuación (2.16). En el caso de materiales almacenados en bobinas, como aluminio reflectante muy utilizado para la fabricación de concentradores solares, la expresión debe ser ampliada con una segunda Gaussiana para tener en cuenta los defectos causados por el bobinado (Pettit, 1977), ecuación (2.17).

$$\rho(\theta) \propto e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_B^2}} \quad (2.16)$$

$$\rho(\theta) \propto \rho_1 e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_1^2}} + \rho_2 e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_2^2}} \quad (2.17)$$

Estas expresiones pueden ser deducidas suponiendo que la dispersión es isotrópica, entonces la función de distribución de probabilidad radial para los defectos de una superficie viene dada por (Johnston, 1995):

$$f(r) = \frac{r}{\sigma_B^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_B^2}} \quad (2.18)$$

donde r es el radio de la circunferencia subtendida entre el rayo dispersado \vec{v}' y el rayo teórico \vec{v} , ver Figura 2.3. La distribución 2.18 forma parte del conjunto de las distribuciones de probabilidad tipo Weibull. Integrando la función densidad de probabilidad se obtiene la distribución de probabilidad siguiente:

$$F(r) = \int_0^r f(r') dr' = \left(1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma_B^2}}\right) \quad (2.19)$$

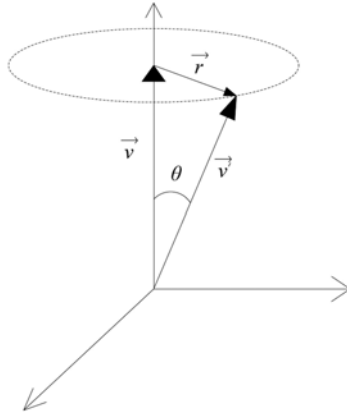


Figura 2.3: Visualización del rayo dispersado \vec{v}' un ángulo θ respecto la dirección teórica \vec{v}

Haciendo uso de la aproximación de muy baja dispersión, válida para todas las superficies consideradas como superficies especulares, esto es $r = 1 \times \text{sen}(\theta) \approx \theta$, se puede escribir la siguiente expresión para la reflectividad de un material, demostrando así la ecuación de Pettit (1977) expresada en (2.16):

$$\rho(\theta) = \rho_{2\pi} \left(1 - e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_B^2}}\right) \quad (2.20)$$

siendo $\rho_{2\pi}$ la fracción total reflejada. A esta cantidad se le llama reflectancia hemisférica y es independiente de la dirección que toman los rayos reflejados.

En el caso de existir varias fuentes de error y siendo todas ellas caracterizadas por una distribución Gaussiana con desviación típica σ_i , a partir del Teorema del Límite Central se puede representar la dispersión angular resultante con una distribución de valor σ_B (Winter et al., 1991):

$$\sigma_B^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \quad (2.21)$$

2.3.2. Transmitancia

El material más utilizado para fabricar cubiertas de captadores solares es el vidrio. El vidrio llamado “borosilicato 3.3” (descubierto por Otto Schott entre 1887-1893) es el más utilizado por sus excelentes propiedades técnicas. La transmisividad de este material es prácticamente constante en el rango de longitudes de onda del espectro solar, ver Figura 2.4. Se observa que en un panel solar el vidrio provoca el efecto invernadero, ya que es opaco a longitudes de onda mayores a 5000 nm, correspondiendo a temperaturas de emisión de cuerpo negro inferiores a 300°C, y posee alta transmitancia para longitudes de onda del espectro solar.

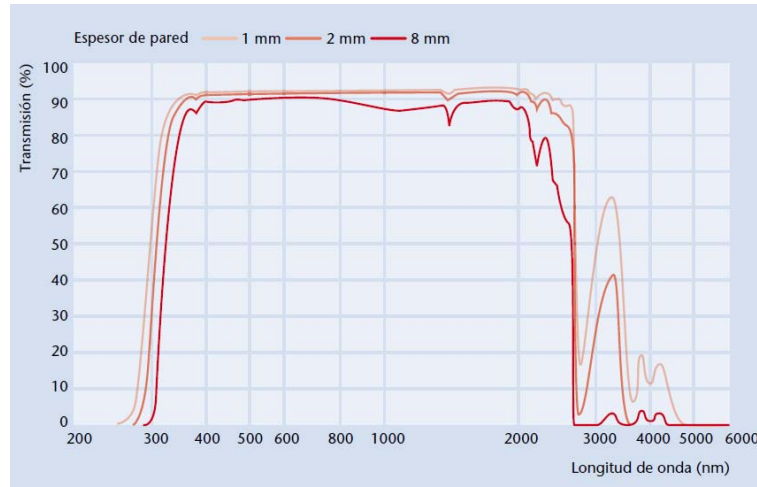


Figura 2.4: Transmisividad del vidrio borosilicato 3.3 para diferentes espesores de pared. Fuente *Schott*® www.schott.com

El rayo incidente se encuentra con dos interfaces al atravesar una cubierta de vidrio. Sin tener en cuenta la absorción del vidrio, haciendo un análisis teórico del trazado de rayos se llega a la siguiente expresión para la transmitancia debida únicamente a efectos de reflexión (Duffie and Beckman, 1991):

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left[1 - r_{\parallel}^2 \right]^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\parallel}^{4n} + \frac{1}{2} \left[1 - r_{\perp}^2 \right]^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\perp}^{4n} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - r_{\parallel}^2}{1 + r_{\parallel}^2} + \frac{1 - r_{\perp}^2}{1 + r_{\perp}^2} \right] \quad (2.22)$$

Teniendo en cuenta la absorción del vidrio se llega a la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{1}{2} \tau_a \left[\frac{(1 - r_{\parallel}^2)^2}{1 - r_{\parallel}^4 \tau_a^2} + \frac{(1 - r_{\perp}^2)^2}{1 - r_{\perp}^4 \tau_a^2} \right] \quad (2.23)$$

donde τ_a es la transmitancia teniendo en cuenta sólo la absortancia del vidrio haciendo uso de la ecuación (2.6):

$$\tau_a = e^{-\frac{kd}{\cos\theta_{tr}}} \quad (2.24)$$

donde d es el espesor del vidrio y θ_{tr} el ángulo de transmisión (refracción), ver Figura 2.2.

Es habitual que las cubiertas transparentes de los captadores solares dispongan de un recubrimiento antirreflejante. A partir de un análisis de interferencia óptica se puede demostrar que una onda EM de longitud de onda λ_0 que incida normalmente a una película fina de espesor d que cumpla las Ecuaciones (2.25) y (2.26) no se reflejará. Gombert et al. (2000) realizan un estudio sobre los efectos de que esta capa tenga diferentes nanoestructuras.

$$d = \frac{\lambda_0}{4} \quad (2.25)$$

$$n_{\lambda_0} = \sqrt{n_2} \quad (2.26)$$

Otros esquemas de multicapas también permiten generar un tratamiento antirreflejante a una superficie de vidrio. No obstante, el método más utilizado para los captadores térmicos es el de una sola capa consiguiendo disminuir la reflectancia en cada interfase del 4 % al 1.5 % (i.e. *SUNARC*®).

2.3.3. Absortancia

Un material capaz de absorber casi toda la energía que le llega (α próximo a uno \approx cuerpo negro) será un excelente material para fabricar captadores solares, pero tendrá el inconveniente de emitir energía nuevamente al exterior aplicando la ley de Kirchhoff. Esta radiación puede evitarse si el material posee propiedades ópticas diferentes para distintas longitudes de onda. Lo más apropiado es que el material se comporte como cuerpo negro en el rango de longitudes de onda del espectro solar (visible) y sea un excelente reflector para longitudes de onda larga (temperatura de trabajo del captador). A estos materiales se les llama materiales selectivos y son utilizados para fabricar los absorbedores de los captadores solares.

Los materiales selectivos absorben la energía incidente en función del ángulo de incidencia. Sin embargo, esta dependencia angular a menudo no se conoce de manera analítica o empírica. Aún así en la literatura se hayan algunas expresiones. Por ejemplo, para materiales pintados de negro Beckman et al. (1977) presentan la siguiente expresión:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1 + 2,0345 \times 10^{-3}\theta_i - 1,99 \times 10^{-4}\theta_i^2 + 5,324 \times 10^{-6}\theta_i^3 - 4,799 \times 10^{-8}\theta_i^4 \quad (2.27)$$

donde α_0 es la absortancia para incidencia normal. Tesfamichael and Wäckelgård (2000) determinan experimentalmente la dependencia angular para dos materiales absorbedores comerciales ($Ni - Al_2 O_3$ y $Ni - NiO_x$), y la ajustan a la expresión propuesta por Rönnelid (1998):

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1 - b \left(\frac{1}{\cos \theta_i} - 1 \right)^c \quad (2.28)$$

donde b y c son coeficientes positivos que dependen del material absorbedor. La Figura 2.5 muestra los tres casos expuestos, la información de las curvas ha sido extraída de las referencias citadas. Se observa que para ángulos de incidencia inferiores a 50° la relación está por encima del 96 %.

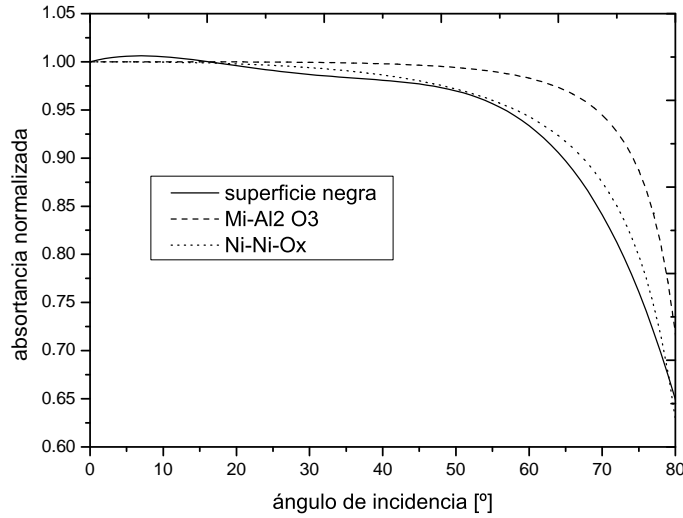


Figura 2.5: Absortancia normalizada de diferentes materiales en función del ángulo de incidencia

2.4. El tamaño angular del Sol

El espectro solar se puede aproximar al espectro de radiación de un cuerpo negro de temperatura superficial 5780K. El Sol irradia 63 MW por cada metro cuadrado de superficie. La constante solar se define como la irradiancia que impacta en una superficie imaginaria a la distancia media entre el Sol y la Tierra, su valor es $1353W/m^2$. La fluctuación de este valor es inferior al $\pm 3,3\%$ anual (Beckman et al., 1977).

La energía que realmente llega a la Tierra se ve atenuada por el efecto de la atmósfera, lo que hace que en un día muy soleado y en incidencia normal llegue a valores pico de $1100W/m^2$. La atmósfera dispersa, absorbe o refleja los rayos solares. Parte de esta energía es emitida en

todas direcciones; es lo que se denomina como radiación difusa. En Palma de Mallorca el 37 % de la radiación total que llega a la superficie terrestre lo hace en forma difusa. La radiación que no sufre ningún cambio en su camino se denomina radiación directa. Esta radiación puede concentrarse.

En sistemas de baja concentración, el Sol puede aproximarse como una fuente puntual. Pero en el caso de concentradores solares de media y alta concentración se debe tener en cuenta el tamaño angular del Sol (Buie, 2004). El Sol tiene un tamaño angular aparente de 9,3 mrad y su aureola se extiende hasta los 87,2 mrad (Buie, 2004). Un método para clasificar la distribución de energía que proviene del Sol se basa en utilizar la cantidad *circumsolar ratio* (CSR). Esta cantidad se define como el cociente entre las irradiancias provenientes de la aureola y la directa (suma de la aureola más el disco solar):

$$CSR = \frac{I_{CS}}{I_D + I_{CS}} \quad (2.29)$$

Buie (2004) demuestra que es posible conocer la dirección de donde provienen los rayos solares con una función definida a trozos dependiendo de la zona de emisión: disco solar o aureola. El autor expone una función para el perfil angular de la energía solar por estereorradián, para un ángulo desviado θ respecto al vector que determina el centro del Sol en función del parámetro CSR:

$$\phi(\theta) = \begin{cases} \frac{\cos(0,326\theta)}{\cos(0,308\theta)} & 0 \leq \theta \leq 4,65 \\ e^{\kappa\theta^{\gamma_b}} & 4,65 < \theta \leq 43,6 \\ 0 & 43,6 < \theta \end{cases} \quad (2.30)$$

donde los coeficientes κ y γ_b vienen dados en función de la magnitud medible CSR:

$$\gamma_b = 2,2 \ln(0,52\chi) \chi^{0,43} - 0,1 \quad (2.31)$$

$$\kappa = 0,9 \ln(13,5\chi) \chi^{-0,3} \quad (2.32)$$

$$\chi = CSR \quad (2.33)$$

entonces las irradiancias provenientes de la aureola I_{CS} y del disco solar I_D vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$I_{CS} = 2\pi \int_{4,65}^{43,6} \phi(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (2.34)$$

$$I_D = 2\pi \int_0^{4,65} \phi(\theta) \operatorname{sen}(\theta) d\theta \quad (2.35)$$

Considerar las ecuaciones de Buie permite determinar de manera más exacta las imágenes producidas por los sistemas ópticos de concentración.

2.5. Rendimiento del captador solar térmico

En esta Sección se exponen los parámetros utilizados para la caracterización de captadores solares térmicos en función de los materiales y radiación que aprovechan.

En el estado estacionario de funcionamiento de un captador solar, la energía útil viene dada por el balance entre energía absorbida en la placa absorbedora y las pérdidas térmicas debidas a los fenómenos de conducción, convección y radiación. El cálculo en detalle de las pérdidas es complejo, sin embargo, y con objeto de poder utilizar una formulación simple, se ha convenido englobar estas pérdidas en el denominado coeficiente global de pérdidas $U_L [W/m^2K]$ el cual se mide experimentalmente y es un dato suministrado por el fabricante (normalmente bajo la normativa vigente y por un laboratorio independiente especializado, i.e. SPF, CENER, TÜV). A continuación se expone el modelo más aceptado para la caracterización de paneles solares descrito en el libro (Duffie and Beckman, 1991).

La experiencia ha demostrado que el coeficiente U_L multiplicado por la diferencia de temperaturas entre la temperatura media de la placa absorbedora T_{ma} y la temperatura ambiente T_a constituye una buena aproximación para cuantificar las pérdidas. Así pues la potencia útil viene dada por el balance de ganancias y pérdidas:

$$\dot{Q}_u = A_a [S - U_L (T_{ma} - T_a)] \quad (2.36)$$

donde A_a es el área de apertura del captador, S es la energía absorbida en la placa absorbedora por unidad de tiempo y superficie de apertura. A la cantidad \dot{Q}_u se denomina energía útil por unidad de tiempo (potencia útil). El coeficiente global de pérdidas puede depender de la temperatura:

$$U_L = a + b(T_{ma} - T_a) \quad (2.37)$$

donde los coeficientes a y b son constantes positivas.

Asumiendo el modelo de cielo isotrópico, y denominando G_{Hb} y G_{Hd} a la irradiación solar directa y difusa en el plano horizontal, la cantidad S de la ecuación (2.36) viene dada por la siguiente expresión:

$$S = G_{Hb} \frac{\cos\theta_i}{\cos\Theta_s} (\tau\alpha)_b + G_{Hd} (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos\beta_c}{2} \right) + \rho_g (G_{Hb} + G_{Hd}) (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos\beta_c}{2} \right) \quad (2.38)$$

donde los subíndices b , d y g representan directa, difusa y albedo respectivamente, β_c es el ángulo de inclinación del panel solar, Θ_s es el ángulo zenital solar y θ_i es el ángulo de incidencia solar que se determina a partir de los ángulos solares y la orientación del captador:

$$\cos\theta_i = \cos\Theta_s \cos\beta_c + \sin\Theta_s \sin\beta_c \cos(\Phi_s - \gamma_c) \quad (2.39)$$

donde Φ_s es el ángulo azimutal solar y γ_c la desviación del panel respecto al Sur geográfico (ángulos hacia el Este son considerados negativos).

Una vez que la energía impacta en el absorbedor es transferida al fluido de trabajo. A la potencia que es capaz de transportar el fluido caloportador se denomina energía ganada por unidad de tiempo. La transferencia de calor entre la placa absorbedora y el fluido de trabajo no es ideal, depende de las características de la placa absorbedora (material, espesor, distancia entre tubos, ...), del estado del fluido (régimen laminar o turbulento), y otros factores como la concentración de radiación y el factor de pérdidas U_L .

La energía ganada se suele expresar en términos de la media aritmética entre temperatura en la entrada y en la salida del fluido T_{av} , dado que es más sencillo medir la temperatura en el fluido que medir la temperatura en la placa absorbedora. La potencia ganada, teniendo en cuenta un factor de transferencia de calor F_{av} entre el fluido y la placa absorbedora, viene dada por:

$$\dot{Q}_g = A_a F_{av} [S - U_L (T_{av} - T_a)] \quad (2.40)$$

Se define eficiencia térmica instantánea del captador al cociente entre potencia ganada y radiación total incidente en el plano del captador:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_g}{A_a G_T} \quad (2.41)$$

donde G_T es la irradiación incidente en el plano del captador. Combinando las Ecuaciones (2.40) y (2.41), la eficiencia instantánea del captador viene dada por la siguiente ecuación:

$$\eta = F_{av} \left[\frac{S}{G_T} - U_L \frac{(T_{av} - T_a)}{G_T} \right] \quad (2.42)$$

La ecuación (2.42) se denominada comúnmente como ecuación básica de rendimiento.

Merece especial atención el factor de ganancias S da la Ecuación (2.38). En la mayoría de los casos, y sobretodo para captadores de placa plana, la expresión (2.38) puede simplificarse tomando un valor medio del producto transmisividad de la cubierta por la absorptividad del material multiplicado a la radiación total en el plano del captador; $S = G_T (\tau\alpha)_{av}$. Entonces

en este caso, y sólo para paneles solares de placa plana, la Ecuación (2.42) se suele expresar como:

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{(T_{av} - T_a)}{G_T} - a_2 \frac{(T_{av} - T_a)^2}{G_T} \quad (2.43)$$

donde los coeficientes a_i son determinados experimentalmente y pueden ser relacionados con las magnitudes ya expuestas.

La fracción de la radiación directa absorbida en un captador con una cubierta de vidrio calculada analíticamente por seguimiento del trazado de rayos es:

$$(\tau\alpha)_b = \tau\alpha \sum_{n=1}^{\infty} [(1 - \alpha)\rho_d]^n \approx \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (2.44)$$

donde $\rho_d \cong \tau_a - \tau$.

Cuando la radiación directa es elevada, la aproximación $(\tau\alpha)_b \cong (\tau\alpha)_{av}$ es válida. A efectos prácticos, la siguiente aproximación puede ser utilizada para condiciones normales de funcionamiento de un captador solar (Duffie and Beckman, 1991):

$$(\tau\alpha)_{av} \cong 0,96 (\tau\alpha)_b \quad (2.45)$$

Otro aspecto importante para la caracterización de captadores es conocer los efectos que se producen cuando la radiación solar no es normal al plano del captador. El factor IAM (*Incidence Angle Modifier*) es el factor utilizado para conocer el comportamiento óptico del producto $(\tau\alpha)_b$ en función del ángulo de incidencia. Para ello se define el IAM como:

$$(K_{\tau\alpha})_b = \frac{(\tau\alpha)_{b\theta_i}}{(\tau\alpha)_{b0}} \quad (2.46)$$

donde $(\tau\alpha)_{b0}$ corresponde al caso de incidencia normal para la radiación directa. También se puede definir un ángulo efectivo, y por tanto un IAM, para la radiación difusa (Duffie and Beckman, 1991).

Una expresión propuesta por Souka and Safwat (1966) para la dependencia angular de $(K_{\tau\alpha})_b$ para captadores de cubierta plana es:

$$(K_{\tau\alpha})_b = 1 + b_0 \left(\frac{1}{\cos\theta_i} - 1 \right) \quad (2.47)$$

donde b_0 es una constante negativa.

Los paneles solares formados por tubos de vacío son sistemas ópticos no simétricos. El modelo comúnmente aceptado para determinar el IAM en estos captadores es el descrito por McIntire (1982) que propone un modelo biaxial, Ecuación (2.48), donde el modificador de ángulo viene

dado por el producto de las componentes transversal y longitudinal a los planos de los tubos de vacío según los ángulos definidos en la Figura 2.6.

$$(K_{\tau\alpha})_b = (K_{\tau\alpha})_t (K_{\tau\alpha})_l \quad (2.48)$$

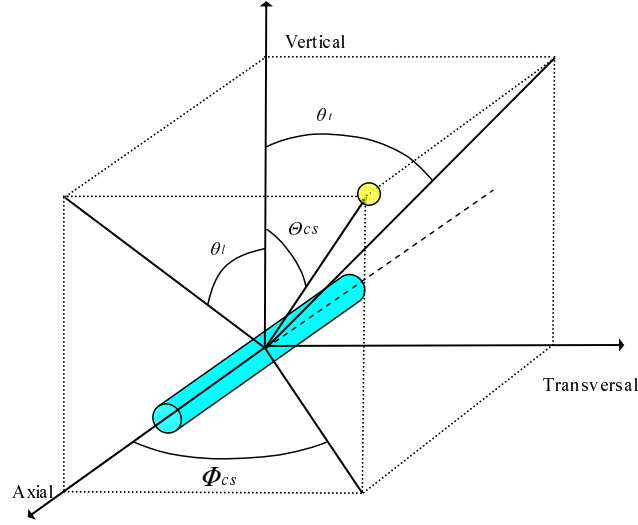


Figura 2.6: Ángulos transversal θ_t y longitudinal θ_l respecto el sistema de tubos de vacío. Los ángulos de posicionamiento del Sol respecto el sistema de los tubos de vacío son: Θ_{cs} para el ángulo zenital solar y Φ_{cs} para el ángulo azimutal solar

Finalmente, con el objetivo de comparar lo visto hasta el momento con el estándar de ensayos según la norma Europea EN-12975-2:2006, la curva característica de un captador solar en el procedimiento de ensayos cuasidinámico viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{\dot{Q}_g}{A_a} = F_{av} (\tau\alpha)_0 (K_{\tau\alpha})_b G_b + F_{av} (\tau\alpha)_0 (K_{\tau\alpha})_d G_d - c_6 u G - c_1 (T_{av} - T_a)^2 - c_2 (T_{av} - T_a) - c_3 u (T_{av} - T_a) + c_4 (E_L - \sigma T_a^4) - c_5 \frac{dT_{av}}{dt} \quad (2.49)$$

donde u es la velocidad del viento en la dirección paralela al captador y E_L las pérdidas radiativas del captador (paneles sin cubierta). Se ha introducido un término capacitivo c_5 y se han separado los términos del IAM en componente directa y difusa. Para más información remitirse a (Perers, 1997) y (Fischer et al., 2004), o bien a la propia norma editada en castellano UNE-EN 12975-2:2006 (AENOR, 2007).

2.6. Consideraciones ópticas de los concentradores solares

Asumiendo la conservación de la energía, un sistema ideal con área de apertura A_a que concentra toda la irradiación que llega J_a hacia un receptor también ideal de superficie de apertura A_r debe cumplir:

$$A_a J_a = A_r J_r \quad (2.50)$$

donde J_r es la irradiancia en el receptor. La relación entre irradiancias $\frac{J_r}{J_a}$ en el caso ideal se denomina concentración de aperturas, dado que es idéntica a la relación $\frac{A_a}{A_r}$:

$$C_a = \frac{J_r}{J_a} = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.51)$$

La concentración de aperturas es el límite máximo de concentración que puede llegar un sistema de aperturas A_a y A_r . Aplicando la segunda ley de la termodinámica Rabl (1976) demuestra que este límite está condicionado por el tamaño angular aparente de la fuente θ_s y depende de si se trata un concentrador puntual o lineal:

$$C_{max,puntual} = \left(\frac{n}{\text{sen} \frac{\theta_s}{2}} \right)^2 \quad (2.52)$$

$$C_{max,lineal} = \frac{n}{\text{sen} \frac{\theta_s}{2}} \quad (2.53)$$

donde n es el índice de refracción del medio. En el caso del Sol $\frac{\theta_s}{2} = \theta_D = 4.65$ mrad, y para $n=1$ se obtienen concentraciones máximas de ~ 46000 y 215 respectivamente.

Para cualquier concentrador ideal las Ecuaciones (2.52) y (2.53) pueden expresarse en función de los ángulos de apertura de la fuente y del concentrador θ_{ap} como (Winter et al., 1991):

$$C_{puntual} = \left(\frac{n \text{sen} \frac{\theta_{ap}}{2}}{\text{sen} \theta_D} \right)^2 \quad (2.54)$$

$$C_{lineal} = \frac{n \text{sen} \frac{\theta_{ap}}{2}}{\text{sen} \theta_D} \quad (2.55)$$

Entonces se deduce que se alcanzarán mayores factores de concentración a medida que la apertura angular del concentrador solar θ_{ap} se aproxime a π .

La concentración geométrica, definida como el cociente entre la apertura del concentrador y la superficie del absorbedor C_g , permite expresar los coeficientes de pérdida por unidad de superficie absorbidora. Con la finalidad de cuantificar las pérdidas térmicas en el receptor de un concentrador solar, asumiendo que la mayoría de pérdidas se producen en el receptor, y partiendo de la Ecuación (2.40), la potencia ganada de un concentrador de concentración geométrica C_g viene dada por (Duffie and Beckman, 1991; Winter et al., 1991):

$$\dot{Q}_g = F_{av} A_a \left[S - \frac{1}{C_g} U_L (T_{av} - T_a) \right] \quad (2.56)$$

donde el coeficiente de pérdidas está referido por unidad de superficie absorbidora.

Teniendo en cuenta que no toda la radiación que atraviesa la apertura llega al receptor y que existe dependencia angular respecto a la posición relativa del sol, la energía absorbida S viene dada por (Duffie and Beckman, 1991):

$$S = G_b (\gamma \rho \tau \alpha)_0 K_{\gamma \rho \tau \alpha} \quad (2.57)$$

donde G_b es la irradiación directa en la apertura del concentrador, $(\gamma \rho \tau \alpha)_0$ es el factor en incidencia normal que tiene en cuenta: γ factor de intercepción (cociente entre la radiación incidente en el reflector y radiación incidente en el receptor), ρ reflectividad del reflector, τ transmitancia, y α absortancia. El factor $K_{\gamma \rho \tau \alpha}$ es el IAM para cualquier posición relativa entre el Sol y el concentrador solar, depende de los ángulos relativos del Sol con el concentrador, y está referido a la radiación directa en el plano del captador (incluye el factor coseno en el denominador).

Finalmente, se define la eficiencia respecto radiación total o bien respecto radiación directa. Esta última es la más utilizada a la hora de caracterizar concentradores solares, dado que la radiación difusa puede ser despreciada para $C_a \gtrsim 10$ (Duffie and Beckman, 1991):

$$\eta_T = \frac{\dot{Q}_g}{A_a G_T} \quad (2.58)$$

$$\eta_B = \frac{\dot{Q}_g}{A_a G_b} \quad (2.59)$$

Capítulo 3

El concentrador solar lineal FMSC

En este capítulo se exponen los concentradores estacionarios de foco móvil *Stationary Reflector Tracking Absorber* (SRTA) y *Fixed Mirror Solar Concentrator* (FMSC) donde en ambos casos el foco describe una trayectoria circular. Se mencionan las ventajas de estos diseños respecto a los de concentradores de reflector móvil. Se exponen las publicaciones del FMSC y se define la geometría de manera analítica. El FMSC es objeto principal de estudio de la Tesis Doctoral.

3.1. Antecedentes

Concentrar la radiación solar tiene la ventaja de poder alcanzar temperaturas más altas, sin embargo dependiendo del nivel de concentración se requiere un mecanismo de seguimiento solar para dirigir el concentrador hacia el Sol. Exceptuando los concentradores de tipo estacionario ($C_a < 2$; i.e. CPC) que no precisan de ningún tipo de seguimiento solar, y los casi-estacionarios ($C_a = 2 - 10$) que precisan orientaciones desde dos veces por año hasta diarias, los concentradores de niveles más altos ($C_a > 10$) precisan de un sistema de seguimiento continuado (ISES, 2001).

Coletores con una eficiencia razonable en el rango de media temperatura se basan, generalmente, en dispositivos de concentración que requieren un mecanismo continuado de seguimiento para el posicionamiento del reflector. Los diseños más extendidos son de tipo cilindro-parabólico y Fresnel. A menudo el hecho de orientar el reflector complica la integración de estos captadores en cubiertas de edificios para usos domésticos e industriales, viéndose incrementado el coste económico de la instalación. Nuevos tipos de concentradores han surgido recientemente con el fin de mitigar este inconveniente (Grass et al., 2004). Un conjunto de concentradores solares que puede alcanzar una alta eficiencia en el rango de media temperatura con buena adaptabilidad en cubiertas son los llamados *Tracking Receiver*, *Stationary*

Reflector (ISES, 2001). La diferencia con los concentradores de reflector móvil es que, en lugar de orientar el sistema de espejos, se orienta únicamente el receptor con la finalidad de interceptar el máximo de rayos solares que proviene de un reflector estacionario. Así se consigue una adaptabilidad en cubiertas similar a los captadores planos pero con las ventajas de los sistemas de concentración. Existen principalmente dos diseños que se mencionan en la literatura: *Stationary Reflector Tracking Absorber* (SRTA) y *Fixed Mirror Solar Concentrator* (FMSC). Ambos aparecieron en los años setenta como consecuencia de la crisis del petróleo y los elevados precios de los colectores cilindro-parabólicos (Russell Jr, 1973; Steward and Kreith, 1975; Kreider, 1975). Los prototipos de los años setenta fueron fabricados para la producción de vapor en centrales de generación eléctrica. El SRTA ha sido analizado en numerosos estudios y existe una demostración de planta piloto a escala comercial desde julio de 2002 para una aplicación de frío solar (Gee, 2004). En cuanto al FMSC, en la actualidad no se tiene constancia de plantas experimentales o de demostración. Algunos prototipos de los años setenta se mencionan en (ISES, 2001) y (Winter et al., 1991). A continuación se describen los dos diseños mencionados:

1. El SRTA: que a nivel comercial lo fabrica la empresa Duke Solar Energy, llamado *PowerRoofTM*. Un prototipo de ensayos se encuentra en Sandia National Laboratories (ISES, 2001). El SRTA se basa en la buena aproximación del segmento central de la circunferencia a la parábola, esta aproximación permite que a una distancia $R/2$ aparece un foco puntual. El receptor se sitúa en el foco en todo momento, para ello se debe hacer pivotar el receptor en una trayectoria circular, ver Figura 3.1. Tiene el inconveniente de desaprovechar parte de la superficie reflectora. Del diseño SRTA existe tanto la versión 2D como 3D (Bar-Lev et al., 1983).
2. El FMSC: se basa en la propiedad geométrica del arco capaz. El receptor también describe una trayectoria circular. Se dispone un conjunto de espejos finitos sobre la generatriz de un cilindro orientados de tal manera que los rayos reflejados por el punto en común entre el cilindro y los espejos se encuentran en un mismo punto sobre el círculo generatriz, ver Figura 3.2. Tiene el inconveniente de desaprovechar la energía reflejada que impacta en los escalones del propio reflector.

Sólo estudios teóricos del FMSC van a ser expuestos. La geometría del FMSC fue propuesta por primera vez por John L. Russell Jr. con la finalidad de encontrar un potencial en la reducción de costes frente a los captadores cilindro-parabólicos en las plantas solares para la generación de electricidad (Russell Jr, 1973). La geometría del FMSC se patentó en 1975 por *General Atomic Company* (US Pa. 3868823). Su equivalencia española ES461198 data de 1977. Posteriormente se han presentado varias patentes y modelos de utilidad relacionados con este diseño. Una de estas es la patente española con número de prioridad PE200703464 por la empresa Tecnología Solar Concentradora SL, algunos de los inventores de dicha patente son el propio autor de la Tesis Doctoral y el director Víctor Martínez Moll, (Martínez Moll et al., 2007b).

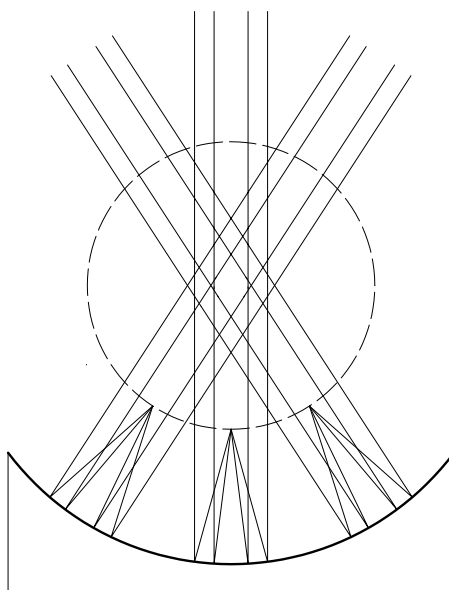


Figura 3.1: Visualización del principio óptico en el que se basa el diseño SRTA. Las líneas paralelas representan los rayos solares que al incidir en un espejo circular se reflejan hacia un mismo punto para el segmento donde el círculo se aproxima a la forma de la parábola (aproximación paraxial). Se observa la trayectoria circular que describe el receptor

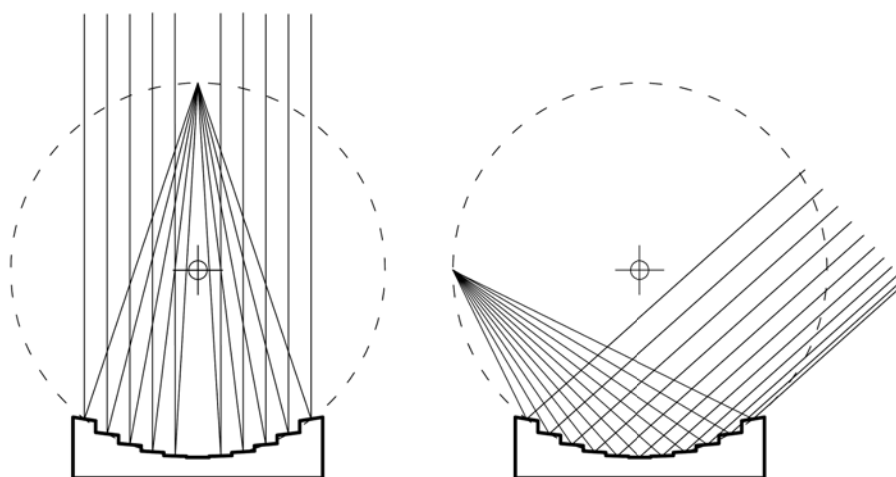


Figura 3.2: Visualización del principio óptico en el que se basa el diseño FMSC. Las líneas paralelas representan los rayos solares que, al incidir en el punto en común entre el espejo y el círculo generatriz, se reflejan hacia un mismo punto. Se observa la trayectoria circular que describe el receptor

El primer estudio detallado sobre el concentrador FMSC fue presentado en la tesis doctoral de Kumar (1974) (discípulo de John L. Russell Jr.). Kumar calculó las pérdidas energéticas causadas por la intercepción de los rayos solares con los escalones por métodos analíticos, determinando la intercepción geométrica de los rayos solares con dichos escalones con una función analítica. Analizó diseños del FMSC simétricos y no simétricos. La energía útil diaria fue calculada con las siguientes limitaciones: asumiendo espejos infinitesimales, espejos ideales, días claros sin nubosidad, y asumiendo que la energía no interceptada por los escalones era siempre capturada por el receptor. Kumar demostró que las pérdidas energéticas para orientación NS eran excesivas, del orden del 50 %, mientras que para orientaciones EO las pérdidas podían ser inferiores al 10 % dependiendo del caso geométrico considerado. Kumar también realiza un estudio 2D más preciso demostrando que es posible alcanzar concentraciones del orden de 40-50. Las pérdidas aumentan rápidamente cuando la desviación estándar σ_B de los espejos aumenta a 4,36 mrad. El modelo 2D de Kumar es un caso muy simplificado de un problema complejo. Tiene en cuenta los errores en la inclinación de los espejos y el cono solar de la radiación solar incidente. Kumar recomienda que un análisis 3D utilizando técnicas de trazado de rayos permitiría conocer el comportamiento de esta geometría con mayor precisión. El propio autor concluye que los resultados son demasiado optimistas y que en futuros estudios se debería analizar este diseño con técnicas de trazado de rayos. Aun así, cabe remarcar que en el trabajo de Kumar se analiza por primera vez la geometría FMSC y se demuestra la posibilidad de que en un futuro, y con la ayuda de estudios más precisos, el FMSC pueda competir con otros diseños ya existentes a nivel comercial.

Russell Jr (1976), director de la tesis de Kumar, propuso un concentrador secundario para aplicaciones que necesitaran mayor factor de concentración y resumió algunos de los resultados de la tesis de Kumar. Los investigadores Nicolás and Durán (1980) analizan las pérdidas energéticas del FMSC usando un método similar al de Kumar pero considerando el tamaño finito de los espejos. Sólo geometrías simétricas fueron analizadas, estos resultados fueron utilizados para encontrar la concentración ideal media y las pérdidas geométricas energéticas en función del tamaño del receptor para orientación EO y NS, alcanzando concentraciones de 14 con un 37 % de pérdidas anuales. Un estudio más detallado (pero también analítico) fue llevado a cabo en 1985 por los mismos autores (Durán and Nicolás, 1985) donde la sombra del receptor y las imperfecciones de los espejos fueron tenidos en cuenta. Antonova and Tarnizhevskii (1986) analizaron la geometría del FMSC y la influencia de los parámetros de diseño.

No fue hasta 2006 donde Pujol et al. (2006); Martínez et al. (2006) realizan un estudio numérico del FMSC con un modelo de *forward-ray-tracing*. En estos trabajos se determina la eficiencia óptica para diferentes parámetros de diseño, pero la dispersión angular de los espejos y el tamaño angular del Sol no se tuvieron en cuenta. Estos trabajos fueron los estudios iniciales que más tarde dieron lugar a la Tesis Doctoral.

3.2. La geometría del FMSC

A continuación se expone una demostración matemática de la existencia del foco, las expresiones que describen la geometría del concentrador, y los parámetros de diseño que la definen. Tan sólo se tendrán en cuenta geometrías del reflector simétricas.

3.2.1. Existencia del foco

La geometría básica del FMSC se fundamenta en un teorema de la geometría plana. Este teorema ya se demostraba en la proposición III.21 del Libro III de la obra Elementos de Euclides: “En un círculo, los ángulos subyacentes de un mismo segmento son iguales” (Euclid, 2007). La siguiente imagen muestra el concepto geométrico de esta proposición.

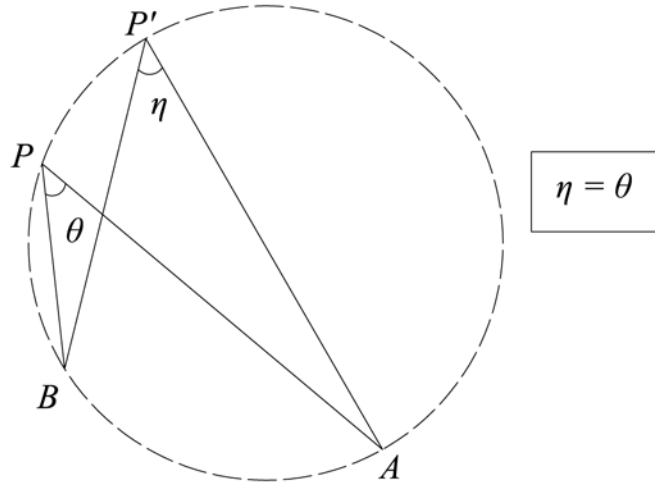


Figura 3.3: Visualización de la proposición III.21 del Libro Elementos de Euclides, también conocida como “arco capaz”

Nos disponemos a demostrar que gracias a esta propiedad es posible diseñar un concentrador solar. En lo sucesivo remitirse a la Figura 3.4. Supongamos dos segmentos reflectores planos situados en posiciones diferentes, *espejo 1* y *espejo 2*. Imaginemos ahora dos rectas paralelas, *recta 1* y *recta 2*, que interceptan con los puntos *A* y *B* de dichos espejos respectivamente. Ahora se realiza una reflexión especular a cada una de las rectas en estos dos puntos. Al punto de intersección de las *rectas reflejadas 1* y *2* lo llamamos *P*.

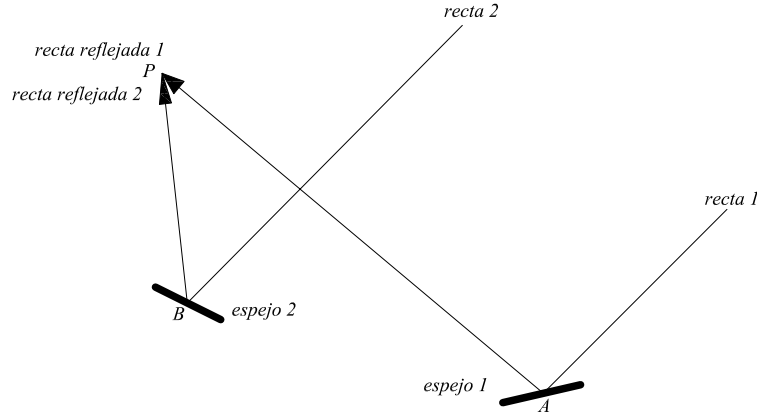


Figura 3.4: Dos *rectas paralelas 1 y 2* después de una reflexión en los *espejos 1 y 2* interceptan en el punto *P*

Con esta configuración particular se ha creado un foco común a los dos espejos para las *rectas paralelas 1 y 2* en los puntos *A y B*.

Imaginemos ahora otras dos rectas no paralelas a las dos anteriores pero sí paralelas entre ellas, *recta 3 y recta 4*. Realizamos de nuevo una reflexión en los mismos puntos *A y B*, al punto donde intersectan las *rectas reflejadas 3 y 4* lo llamamos *P'*. Ver Figura 3.5.

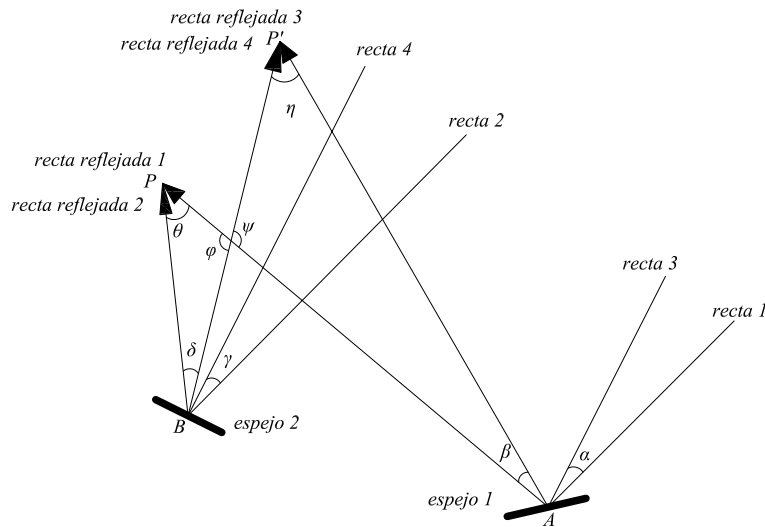


Figura 3.5: Las *rectas paralelas 3 y 4* interceptan en *P'*. Se exponen los ángulos de intersección entre rectas

A partir de de la Figura 3.5 fijémonos que por construcción y aplicando la ley de la reflexión se cumple $\beta = \alpha = \gamma = \delta$. Dado que $\varphi = \psi$ por ser ángulos opuestos, se concluye que los triángulos $\triangle \beta\psi\eta$ y $\triangle \delta\varphi\theta$ son semejantes. Por tanto $\eta = \theta$, y si esto ocurre implica que los puntos A, B, P y P' pertenecen a un mismo círculo por la proposición de Euclides vista anteriormente. Ver Figura 3.6.

Se demuestra la existencia de un nuevo foco para las *rectas 3* y *4* situado sobre el círculo definido por los puntos A, B, P ; a este círculo lo llamaremos círculo generatriz. Como las *rectas 3* y *4* se han escogido al azar, queda demostrado también que para cualquier par de rectas paralelas que pasen por los puntos A y B existe un foco común situado sobre dicho círculo. Por otra parte, cualquier otro espejo situado sobre el mismo círculo y con la inclinación adecuada tendrá el mismo foco que los dos anteriores, ya que cumpliría las dos condiciones necesarias para ello.

Ahora bien, si en lugar de considerar rectas paralelas consideramos rayos solares paralelos que inciden en la superficie de los espejos, se obtiene un diseño de un concentrador solar lineal con reflector estacionario y foco móvil siguiendo una trayectoria circular tal como queríamos demostrar.

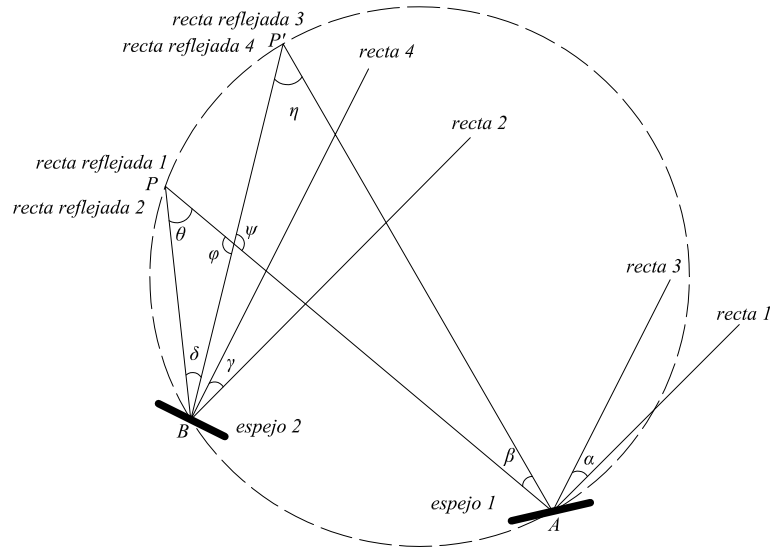


Figura 3.6: Demostración geométrica de la existencia de un foco sobre el círculo generatriz

3.2.2. Definición de la geometría del reflector

Se puede expresar mediante sencillas fórmulas analíticas la forma geométrica del reflector, que consiste en determinar la posición e inclinación de los espejos que lo forman. Se definirá

la geometría en los ejes de coordenadas cartesianos OX, OZ . Se reserva el eje OY para la dirección axial. Ver Figura 3.7.

Dado que la posición de los espejos es fija, y por tanto independiente de la dirección de los rayos solares, consideramos por simplicidad el caso en que los rayos inciden perpendicularmente a la apertura del concentrador, dirección que viene dada por el vector unitario en dirección $-\vec{Z}$.

El reflector definido viene dado por las siguientes restricciones:

1. El reflector es simétrico respecto al eje OZ
2. Todos los espejos tienen la misma apertura a
3. A fin de concentrar la mayor radiación posible, el punto medio de cada espejo intersecciona el círculo generatriz, ya que es el único para el cual existe un foco común
4. Los espejos se colocan de tal manera que sus proyecciones en el eje OX no se superpongan, así se consigue minimizar la superficie reflectora

Comenzamos con la descripción del círculo generatriz. El círculo viene descrito por su ecuación característica en coordenadas cartesianas de radio R y su centro en el punto $x = 0, z = R$:

$$x^2 + (z - R)^2 = R^2 \quad (3.1)$$

Dado que el reflector es simétrico, es suficiente determinar la posición de los espejos en la parte positiva del eje OX . Los espejos se etiquetan con el subíndice i que comprende valores naturales ($i = 1, \dots, n$). La posición de cada espejo vendrá dada por el punto que intersecciona al círculo (punto medio) y su inclinación, así pues es necesario determinar tres parámetros para cada espejo: x_i, z_i , y φ_i respectivamente.

Empezamos con la colocación del espejo central ($i=1$). Esta operación es trivial, ya que tiene inclinación cero para construir un concentrador simétrico. Veamos como a partir de la colocación del *espejo* 1 se puede colocar el siguiente y así sucesivamente. Observando la Figura 3.7 para el espejo $i=2$ se llega a las siguientes expresiones para el espejo i :

$$x_i^2 + (z_i - R)^2 = R^2 \quad (3.2)$$

$$2\varphi_i = \text{atan} \left(\frac{x_i}{2R - z_i} \right) \quad (3.3)$$

$$x_i = x_{i-1} + \frac{a}{2} [\cos(\varphi_{i-1}) + \cos(\varphi_i)] \quad (3.4)$$

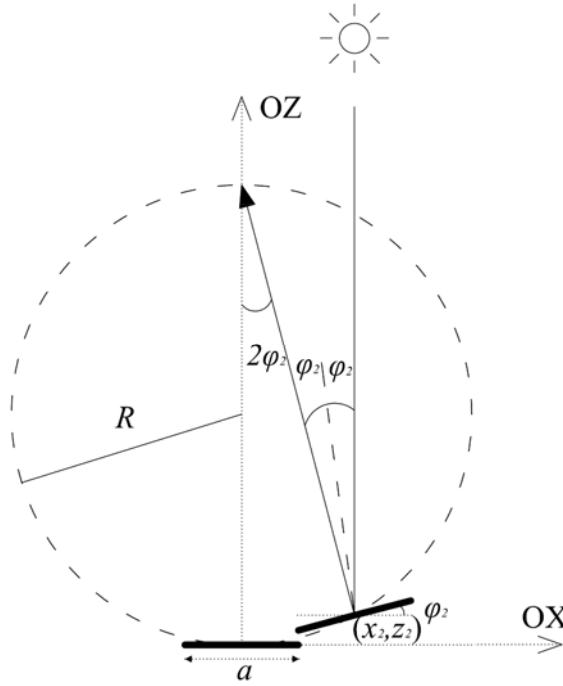


Figura 3.7: Construcción geométrica del reflector

El sistema de Ecuaciones (3.2), (3.3) y (3.4) es un sistema de tres ecuaciones y cuatro incógnitas para cada espejo, a saber x_i , y_i , φ_i y a . Existen varias posibilidades para cerrar el sistema de ecuaciones, una de ellas consiste en dar un valor a la anchura de los espejos a . Otra opción es facilitar el número de espejos que forma el reflector acotando la apertura del mismo. Si la solución existe, estas dos opciones llevan a una solución única del sistema de ecuaciones.

Determinar a priori a tiene la ventaja de conocer la anchura de los espejos pero se desconoce la apertura del concentrador hasta que se resuelve el sistema. La segunda opción permite construir la geometría conociendo a priori el número de espejos que lo forman y fijando la amplitud del concentrador. A efectos prácticos se ha escogido la segunda opción, ya que facilita la comparación entre diferentes geometrías por tener la misma apertura de captación solar sin tener que reescalar la geometría una vez generada.

Tomando la segunda opción se cierra el sistema de ecuaciones con la siguiente expresión:

$$a = \frac{W}{1 + 2 \sum_{i=2}^n \cos(\varphi_i)} \quad (3.5)$$

donde W es la amplitud del concentrador. Obsérvese que el concentrador tendrá $N = 2n + 1$ espejos. Entonces son necesarios tres parámetros para determinar la geometría:

- *Número de espejos* : N
- *Amplitud del concentrador* : W
- *Radio del círculo generatriz* : R

Se define ahora el parámetro F/W , cociente entre la distancia del foco en su posición más alta y la amplitud del concentrador. Fijémonos que $F = 2R$. Si ahora se toma como unidad de longitud la amplitud del concentrador, esto es $W = 1u$ siendo u la unidad de longitud, dos parámetros son suficiente para definir la geometría: N y F/W .

La Figura 3.8 muestra un ejemplo con parámetros $F/W = 1,5$ y $N = 11$ como resultado de resolver el sistema de Ecuaciones (3.2), (3.3) y (3.4) aplicando (3.5). Se obtiene que el ancho de los espejos es $a=0.0913 u$ y la altura del reflector $h=0.1609 u$.

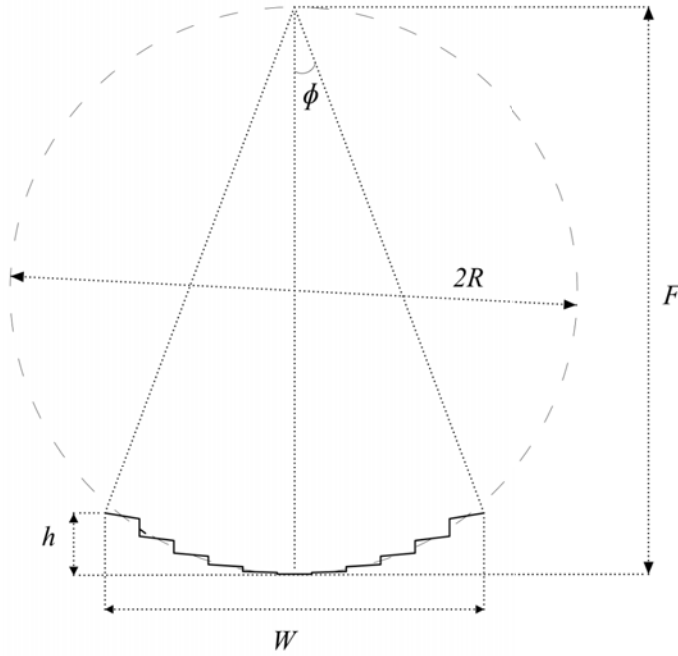


Figura 3.8: Geometría del FMSC para $F/W=1.5$ y $N=11$

El ángulo ϕ en la Figura 3.8 es el semiángulo de apertura del concentrador $\phi = \frac{\theta_{ap}}{2}$. En el análisis de concentradores solares se suele facilitar el valor de este ángulo como característica del mismo, dado que, como se ha visto en la Ecuación (2.55), está relacionado con la concentración máxima que puede alcanzar el concentrador solar.

Kumar (1974) utilizó el semiángulo de apertura ϕ como parámetro de diseño (no necesitaba más que un parámetro porque hizo la aproximación de espejos infinitesimales). Aquí se ha

preferido utilizar el parámetro F/W , ya que el semiángulo ϕ no se conoce hasta que el sistema de ecuaciones es resuelto. El parámetro F/W resulta ser un valor que da idea de la forma que tendrá el sistema completo, por ejemplo, un diseño con $F/W = 2$ significa que el diámetro de la trayectoria que describe el receptor dobla la apertura del reflector.

3.2.3. Posición del foco

En este apartado se describe la posición del foco en función de la posición relativa del captador con el Sol. En primer lugar se considera el caso 2D, esto es cuando los rayos solares pertenecen al mismo plano que contiene al círculo generatriz.

Consideramos un rayo que incide con ángulo θ_s en el espejo central del reflector. Determinamos ahora la posición del foco considerando la reflexión que se produce en el punto medio del espejo central como se muestra en la Figura 3.9.

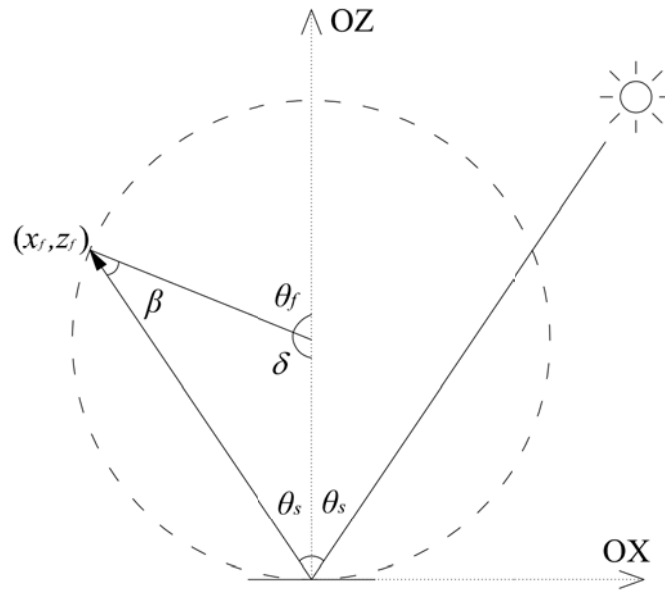


Figura 3.9: Reflexión de un rayo solar en el punto medio del espejo central para la determinación de la posición del foco.

En primer lugar nos fijamos que los ángulos β i θ_s son idénticos por ser los ángulos agudos de un triángulo isósceles, luego $\delta = \pi - \theta_s - \theta_s$. Como $\theta_f = \pi - \delta$, podemos escribir el ángulo θ_f , que determina la posición del foco, en función del ángulo solar θ_s :

$$\theta_f = 2\theta_s \quad (3.6)$$

Para el caso 3D, y por tanto cuando la radiación solar puede venir de cualquier dirección representada por un vector unitario \vec{u} , la posición del receptor vendrá dada por el ángulo entre el vector \vec{u} proyectado en el plano XZ y el eje OZ . A este ángulo proyectado lo llamaremos θ_{pr} y viene dado por:

$$\tan(\theta_{pr}) = \frac{\sin(\Theta_{cs}) \cos(\Phi_{cs} + \pi)}{\cos(\Theta_{cs})} \quad (3.7)$$

donde Θ_{cs} y Φ_{cs} son los ángulos solares zenital y azimutal respectivamente relativos al concentrador; se ha tenido en cuenta la reflexión que sufren los rayos sumando un ángulo π al ángulo azimutal. La posición del foco en coordenadas cartesianas viene dado por:

$$x_f = R \sin(2\theta_{pr}) \quad (3.8)$$

$$z_f = R + R \cos(2\theta_{pr}) \quad (3.9)$$

Obsérvese que el ángulo proyectado θ_{pr} es igual al ángulo transversal θ_t definido en la Figura 2.6.

De la Ecuación (3.6) se observa que el foco realiza una vuelta completa mientras que el Sol da media vuelta en su recorrido diurno. Pero el receptor no podrá realizar la vuelta completa debido a las interferencias con los espejos. Se puede ver fácilmente que el ángulo límite de posicionamiento del receptor, esto es el ángulo máximo hasta donde puede realizar el seguimiento solar, será aproximadamente:

$$\theta_{f,LIM} \approx \pi - \theta_{ap} \quad (3.10)$$

decimos aproximadamente porque dependerá del tamaño del receptor y de los espejos.

3.2.4. El receptor

En cuanto al tipo de receptor para el FMSC, se ha considerado un receptor del tipo tubo evacuado de aleta plana. En la Sección 4.5 del Capítulo 4 se dan más detalles del mismo. Ver la siguiente Figura para conocer las cotas consideradas.

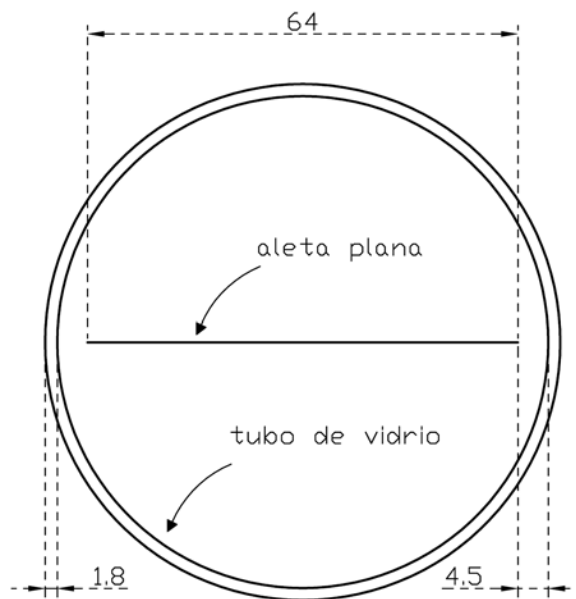


Figura 3.10: Dimensiones del tubo evacuado considerado como receptor en unidades $1000 \times u$ para un caso analizado con $N=25$ y $F/W=1.0$

3.3. Resultados

Se ha visto que los parámetros necesarios para definir la geometría del reflector son dos: F/W y N . Existe entonces una gran variedad de perfiles que puede tomar el reflector. Se ha realizado un sencillo análisis para conocer cómo varía la geometría, y lo que ello supone, según estos dos parámetros de diseño.

En primer lugar se analiza cómo varía el ancho de los espejos a , la altura h y el semiángulo de apertura del concentrador ϕ según los dos parámetros de diseño. Los resultados se muestran en la Figura 3.11.

Se observa que el ancho de los espejos a disminuye cuando el número de espejos aumenta, y lo hace de manera hiperbólica. Por otro lado la amplitud de los espejos a también disminuye, pero muy débilmente, al aumentar F/W . En el límite cuando $F/W \rightarrow \infty$ se obtiene $a=1/N$. En la Tabla 3.1 se exponen algunos resultados. Comparando diseños con mismo valor de F/W , al aumentar el número de espejos la altura h aumenta, así como también el semiángulo de apertura. Sin embargo esta dependencia se suaviza para valores de F/W grandes. Comparando diseños con mismo número de espejos se observa que al aumentar F/W la altura y la apertura angular disminuyen.

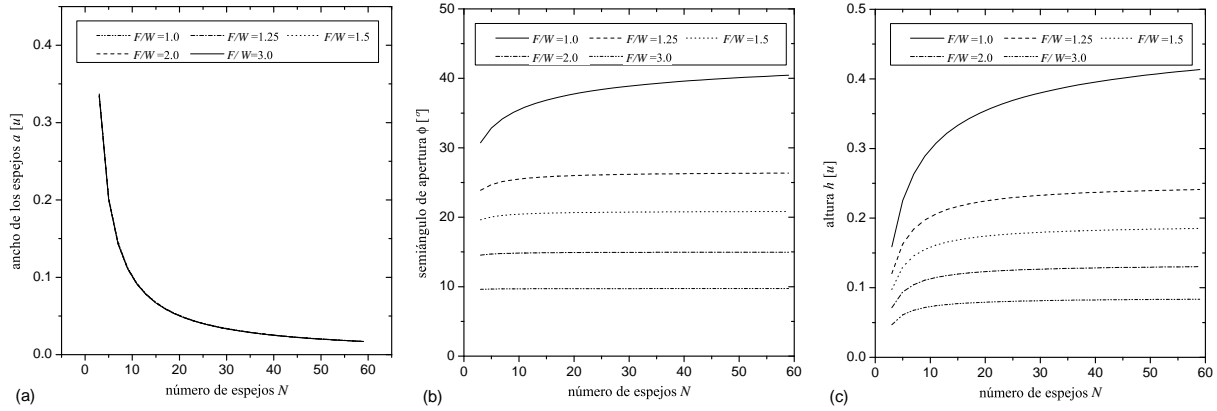


Figura 3.11: Dependencia de la anchura de los espejos (a), semiángulo de apertura (b) y altura del concentrador (c) en función de N para valores $F/W=1.00$, 1.25, 1.50, 2.0 y 3.00

F/W	N	a [u]	h [u]	$\phi^{[0]}$
1.0	9	0.113	0.289	35.10
1.0	15	0.068	0.333	36.85
1.0	25	0.041	0.369	38.40
2.0	9	0.111	0.111	14.85
2.0	15	0.067	0.120	14.90
2.0	25	0.040	0.125	14.95

Tabla 3.1: Ancho de los espejos a , altura que toma el concentrador h y semiángulo de apertura ϕ para diferentes parámetros de diseño F/W y N

A la vista de estos resultados parece razonable diseñar concentradores con valores de F/W pequeños, dado que el ángulo de apertura del concentrador es mayor y con ello aumenta la concentración geométrica máxima del mismo, como puede observarse en la Figura 3.12a aplicando la Ecuación (2.55).

Para completar este análisis se ha estimado el tiempo de seguimiento solar que puede realizar el receptor en un caso muy particular pero a la vez representativo: concentrador orientado en dirección NS e inclinado un ángulo igual a la latitud del lugar en los días del equinoccio. En estas condiciones el tiempo máximo de captación diario es de 12 horas, y el Sol describe un movimiento circular uniforme. Entonces resulta que, a partir de un análisis sencillo, las horas de seguimiento solar que puede realizar el receptor es:

$$t = \frac{\pi - \theta_{ap}}{\omega_{sol}} \quad (3.11)$$

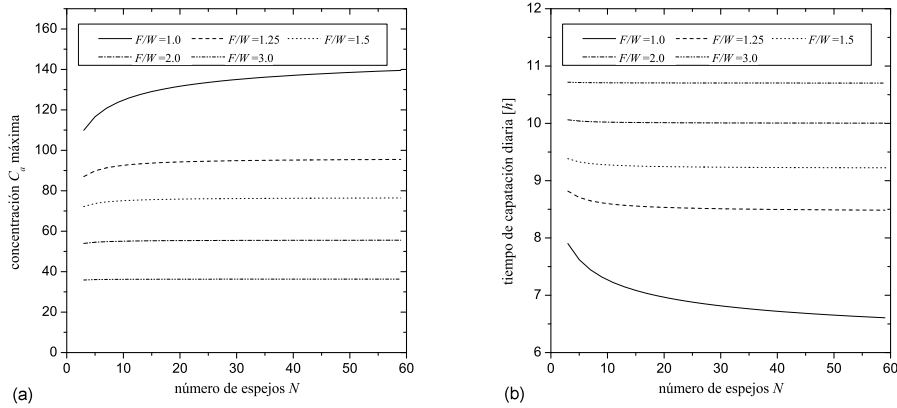


Figura 3.12: (a): Concentración máxima en función de N . (b): Horas de seguimiento solar en función de N . Curvas para $F/W=1.00$, 1.25 , 1.50 , 2.00 y 3.00

siendo $\omega_{sol} = \frac{2\pi}{24}$ la frecuencia angular del Sol medida en $rad.horas^{-1}$.

En la Figura 3.12b se observa que a medida que F/W decrece el tiempo de seguimiento solar es menor, lo mismo ocurre al aumentar el número de espejos. Aunque para valores grandes de F/W permanece casi constante. Entonces se observa que diseños con altas concentraciones, ver Figura 3.12a, disponen de menos tiempo de captación, sin embargo cabe tener en cuenta que este tiempo no aprovechable no pertenece a las horas centrales del día cuando la radiación solar es máxima.

Para obtener un buen comportamiento del captador es necesario llegar a concentraciones altas y a la vez un tiempo de captación elevado. Estos dos factores pertenecen a conjuntos de valores de F/W opuestos. Por tanto un análisis más detallado es necesario para hallar pares de valores F/W y N que den lugar a máximos de captación, y encontrar así valores óptimos de estos parámetros de diseño.

3.4. Conclusiones

Las ventajas de los concentradores estacionarios de foco móvil se resumen en:

- Más adaptable en cubiertas que los concentradores Fresnel y cilindro-parabólicos
- Al tener el reflector fijo se disminuyen las cargas al mecanismo de seguimiento
- Es posible aprovechar casi toda la superficie útil al no ocasionarse sombras entre reflectores
- Son diseños que permiten llegar a concentraciones geométricas medio-altas

El FMSC no ha sido analizado con métodos numéricos de *ray-tracing*. Las publicaciones relevantes son anteriores a los años 90 y los resultados son poco representativos. Aún así, de estas publicaciones se desprende que este diseño puede cubrir una demanda tecnológica emergente.

Por otro lado, de este primer análisis, se ha visto que diseños con concentraciones geométricas altas presentan un tiempo de seguimiento inferior a otros de baja concentración, desperdiçando hasta un 40 % del tiempo de captación en las primeras y últimas horas del día (i.e. $F/W=1$, $N=59$ frente a $F/W=3$, $N=3$). Esto implica que, a pesar de que el captador tendrá mayor rendimiento térmico cuanto mayor sea la concentración, el tiempo de captación será inferior. Cabe esperar entonces un punto óptimo de N donde la captación sea máxima para cada valor de F/W .

Otros factores como: orientación, clima, temperatura de trabajo, propiedades ópticas de los materiales, época de captación... también afectan al rendimiento. Así pues son muchos los parámetros que cabe tener en cuenta para cuantificar el rendimiento y encontrar geometrías que optimicen la energía captada según el caso.

Por todo ello, y el actual interés sobre sistemas de captación solar de media temperatura integrable en edificaciones, hace que sea muy atractivo desarrollar una metodología para determinar el comportamiento del FMSC con el objetivo de encontrar diseños óptimos.

Capítulo 4

Metodología utilizada

En este capítulo se exponen diferentes métodos para analizar el comportamiento óptico de sistemas de concentración solar. Se describe el programa de *ray-tracing* desarrollado. Se expone la metodología utilizada para el análisis del FMSC, que consiste en calcular los modificadores de ángulo IAM en función de los parámetros de diseño, para después determinar la eficiencia media anual del FMSC en una localidad determinada. Se define el modelo del receptor y se exponen los tres climas de las localidades consideradas.

4.1. Métodos de análisis de concentradores solares

Para conocer el comportamiento óptico de un concentrador solar es necesario determinar el modificador de ángulo IAM, factor $K_{\gamma\rho\tau\alpha}$ de la Ecuación (2.57), que como se ha visto en el Capítulo 2 depende de la posición relativa del Sol con el concentrador. Existen varios métodos para calcular el comportamiento óptico de un concentrador solar. A continuación se describen los métodos más relevantes:

1. Métodos puramente geométricos: Es el método más rápido pero a la vez más simplificado para analizar un concentrador solar. Consiste en trazar geométricamente los rayos más significativos (bordes, puntos singulares, rayos límite de diseño,...) y determinar su posición en el receptor. Raramente se tienen en cuenta las sombras. Los coeficientes de reflexión y de absorción se suponen constantes e independientes del ángulo de incidencia. En ocasiones se considera el tamaño aparente del Sol. Con este método no se puede calcular la distribución de energía en el receptor. Algunos ejemplos se encuentran en (Rabl, 1976; Donald et al., 1978; Kandapl et al., 1980).
2. Métodos analíticos: Este método permite determinar la radiación que impacta en el receptor mediante una función matemática conocida. Dicha función se obtiene de un

análisis geométrico previo. Integrando la función sobre la superficie del receptor se obtiene la distribución de energía. Para tener en cuenta los errores en la dispersión especular de los espejos se engloban todos en un único término que viene dado por una distribución de probabilidad Gaussiana, Ecuación (2.21). Es habitual utilizar este método para analizar concentradores de curvas o superficies continuas analíticas (2D o 3D). Algunos ejemplos pueden verse en (Mijatović et al., 1986; Pettit et al., 1983; Kumar, 1974; Durán and Nicolás, 1985; Nicolás and Durán, 1980). La geometría FMSC ha sido analizada con métodos analíticos en las referencias citadas.

3. Métodos de trazado de rayos: Es el método más preciso para determinar tanto la energía captada como la distribución de la misma en el receptor. El método consiste en realizar un seguimiento de la trayectoria de cada uno de los rayos según las propiedades ópticas de los materiales que se va encontrando en su camino. Dado que tanto las propiedades ópticas de los materiales como el perfil de la radiación solar se conocen a través de una función distribución de probabilidad, estos métodos son implementados con métodos de Monte-Carlo para tener en cuenta el carácter estocástico del problema. Existen numerosos códigos de *ray-tracing*. Sin embargo no todos ellos son útiles para el estudio de concentradores solares. Algunos que sí se utilizan para este propósito son: OptiCad, ASAP, TracePro (comerciales), RaySim, Radiance, Tonatiuh (de libre distribución) y otros usados tan sólo por sus autores. Algunos ejemplos pueden verse en (Pujol et al., 2006; Jones Peter and Wang, 1995; Brogren, 2004; Grass et al., 2004).

Debido a la geometría escalonada del FMSC, cuya determinación se realiza mediante solución numérica, y al disponer de un receptor móvil, no existe forma alguna de encontrar una función analítica que, en función de los parámetros de diseño, permita calcular la energía en el receptor en función de la posición del Sol. Por todo ello conocer el comportamiento óptico del FMSC se convierte en un problema complejo que sólo con la técnica de trazado de rayos es posible solucionar. Con la finalidad de encontrar geometrías óptimas en función de las condiciones de trabajo y parámetros de diseño, se ha desarrollado un código propio de *ray-tracing* para poder analizar la multitud de geometrías posibles. A continuación se describe el programa de *ray-tracing* desarrollado.

4.2. Código *forward-ray-tracing*

Se ha llevado a cabo la implementación de un código informático para el análisis de concentradores solares. Se trata de un *forward-ray-tracing*. El término *forward* se utiliza para especificar que los rayos son emitidos hacia delante, esto es, de la fuente hacia el sistema que se desea analizar. A diferencia de otros que, utilizando la propiedad de reversibilidad del camino óptico de la luz, se emiten los rayos de la superficie a analizar, comúnmente el receptor, hacia atrás: *backward-ray-tracing*. El tratamiento de la Ecuación (2.57) depende de

la geometría del concentrador y las propiedades de los materiales. Véase la Figura 4.1 para una visualización del trazado de rayos desarrollado.

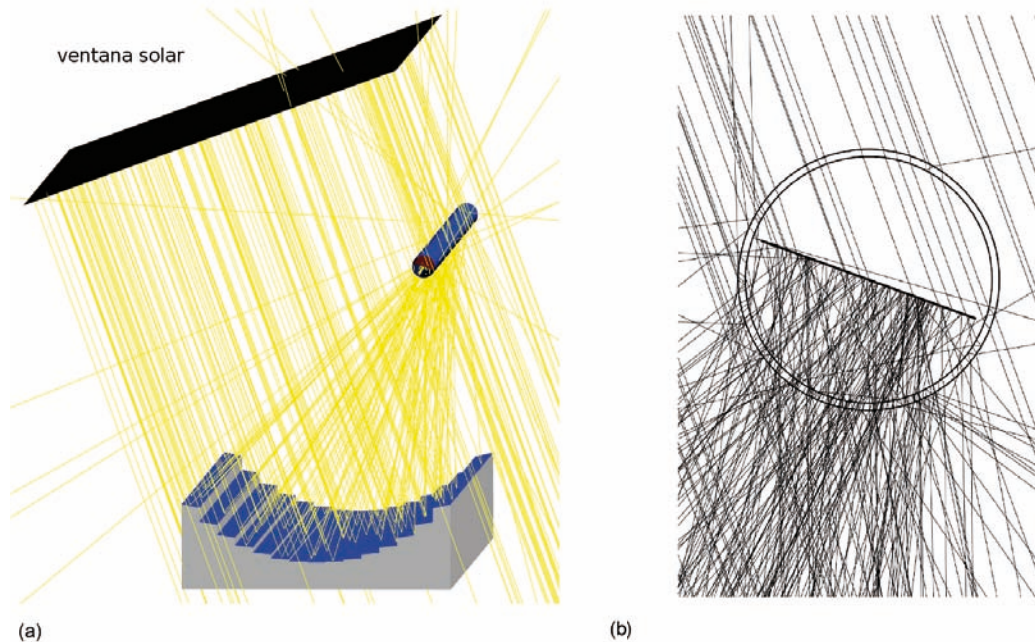
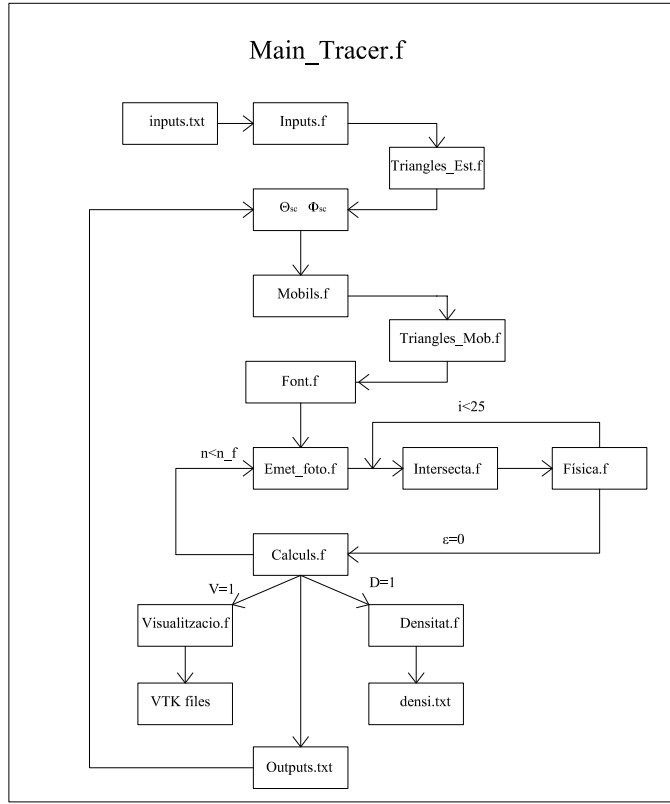


Figura 4.1: Salida gráfica del *ray-tracing* con 300 rayos emitidos utilizando el visualizador MayaVi (<http://mayavi.sourceforge.net/>). (a): visión global del sistema, rayos y ventana solar. (b): vista frontal del mismo trazado de rayos en la región del receptor. Se observan las diferentes trayectorias de los rayos causados por reflexión, refracción y dispersión.

La geometría del sistema es construida por elementos discretos con superficies triangulares, de modo que cualquier sistema podría ser analizado y estudiado con un número suficientemente grande de superficies triangulares. En cuanto a las propiedades que pueden tomar estas superficies triangulares, se han implementado cuatro tipos de materiales: superficie especular, superficie opaca, superficie de interficie (para implementar vidrio) y superficie absorbadora (el receptor). Un archivo de entrada contiene toda la información para cada superficie triangular, tanto las coordenadas 3D como las propiedades del material que lo forman. Se calculan las trayectorias de cada uno de los rayos emitidos por una fuente que emite rayos a todas las superficies del sistema. La ventana solar es rectangular y su tamaño se determina mediante algoritmo para iluminar el sistema completo y ajustando su tamaño para evitar que se emitan rayos sin ninguna posibilidad de que vayan hacia el sistema. Sólo se tiene en cuenta la radiación directa. El tamaño angular del Sol es modelado de acuerdo con las ecuaciones de Buie vistas en el Capítulo 2, y las ecuaciones de Fresnel se han implementado con métodos de Monte-Carlo. El programa permite calcular el rendimiento óptico del sistema y la distribución de la radiación en el absorbador.

Figura 4.2: Esquema del código *ray-tracing*

El esquema de cálculo del programa se puede observar en la Figura 4.2. Se ha programado en código FORTRAN. En primer lugar se carga la geometría a analizar (inputs.f) y un fichero de entrada (inputs.txt) donde se especifica el cálculo que se va a realizar. La geometría viene dada por superficies y estas pueden ser estáticas o móviles, las estáticas son las que permanecen inmóviles durante el cálculo, así que estas ya pueden ser añadidas al vector de superficies del programa (Triangles_Est.f). Seguidamente se generan de manera ordenada valores del cenit Θ_{cs} y del azimut Φ_{cs} solar para determinar la posición del Sol respecto al sistema. En el caso de que haya superficies móviles se encuentra su nueva posición espacial según estos dos ángulos. Ahora se añade al vector superficies las nuevas superficies móviles (Triangles_Mob.f). Una vez se tiene toda la información del sistema se crea una “ventana” que simula la fuente solar (Font.f) y de donde se van a emitir los rayos. Esta ventana es suficientemente grande como para bañar con los rayos todas las superficies introducidas y lo suficientemente pequeña (calculada con un algoritmo) como para evitar bañar espacio donde no hay superficies, así se evita desperdiciar rayos durante el cálculo. Es una ventana rectangular. El siguiente paso es generar aleatoriamente un rayo de la ventana solar (Emet_foto.f) y calcular cuál es la superficie del sistema con la que intercepta (Intersecta.f). Al rayo se le asigna una energía $\varepsilon_0=1$ cuando es emitido por la ventana solar. Cada vez que el rayo se encuentra con una superficie

se le asigna un nuevo vector de dirección y su nueva energía ε como consecuencia de esta interacción (Física.f). En el caso de que el rayo no encuentre ninguna superficie desaparece y su energía se hace cero, $\varepsilon=0$; en el caso de que un rayo sufre más de 24 intercepciones también se le asigna energía cero con la finalidad de evitar infinitas reflexiones. Por otra parte en el caso de impactar con el receptor se suma la energía del rayo a la energía capturada en todo el proceso, después se aplica $\varepsilon=0$. En total se emiten n_f rayos desde la ventana solar. Para finalizar, en el caso de querer analizar la densidad de energía en el receptor o querer visualizar el trazado de rayos de forma gráfica se procede al cálculo de los ficheros de salida *densi.txt* y *VTK* respectivamente. En los ficheros *Outputs.txt* se guardan los resultados. Se repite el proceso para otro par de valores del cenit Θ_{cs} y del azimut Φ_{cs} . A continuación se describen los detalles de cálculo.

4.2.1. Intersección de un rayo con un triángulo

La geometría del sistema se introduce mediante un tipo de forma geométrica: triángulos. Mediante triángulos se puede generar cualquier geometría con la precisión que se desee. Así pues, sólo se necesita un algoritmo para detectar cuál es la superficie que en primer lugar encuentra el rayo a lo largo de su recorrido: intersección entre una recta y un triángulo en el espacio. El algoritmo utilizado es el descrito por Eberly (2001).

4.2.2. Generación de números aleatorios

Durante el cálculo es necesario generar números aleatorios, es preciso disponer de un generador de números aleatorios independientes y uniformemente distribuidos en el intervalo (0,1). Existen varios métodos para generar números aleatorios, uno de ellos es mediante generadores congruenciales lineales. Un generador de este tipo, y escogido para los cálculos, es el denominado MTH\$RANDOM de la librería VAX/VMS. Este generador viene implementado por la siguiente función en FORTRAN:

```
real*8 function aleatori(sem)
implicit none
real*8 a,c,sem,m,rm
parameter (m=2.d0**32,rm=1.0d0/m)
parameter (a=69069.0d0,c=1.0d0)
sem=mod(sem*a+c,m)
aleatori=rm*sem
return
end
```

El método MTH\$RANDOM cumple las condiciones necesarias y suficientes para asegurar que la longitud de la serie es máxima.

También es necesario disponer de un generador de números aleatorios no uniforme para generar valores de una variable aleatoria de función densidad de probabilidad conocida (i.e. tamaño del sol, dispersión especular en los espejos). El método genérico para ello hace uso del siguiente resultado:

Si \hat{u} es una variable aleatoria comprendida en el intervalo $(0,1)$ entonces la variable aleatoria:

$$\hat{x} = F_{\hat{x}}^{-1}(\hat{u}) \quad (4.1)$$

tiene como función de distribución de probabilidad a la función $F_{\hat{x}}(x)$.

4.2.3. El tamaño angular del sol

Como se ha visto en el Capítulo 2, el perfil de radiación angular del Sol viene dado por las ecuaciones de Buie. Integrando estas ecuaciones se obtiene la función distribución de probabilidad de que un rayo sea emitido con una desviación angular θ respecto a la dirección del rayo central. El primer trozo de la función que describe el tamaño solar, que abarca todo el disco solar de 0 a 4.65 mrad, viene dada por la Ecuación (2.35). Haciendo la aproximación para ángulos pequeños $\sin(\theta') \approx \theta'$ la integral (2.35) puede expresarse como:

$$I_D \approx 2\pi \int_0^{4,65} \frac{\cos(0,326\theta')}{\cos(0,308\theta')} \theta' d\theta' \quad (4.2)$$

Así pues la función distribución de probabilidad para un rayo que salga desviado un ángulo θ respecto el vector central en la zona del disco solar viene dada por:

$$F_D(\theta) \approx a_1 2\pi \int_0^\theta \frac{\cos(0,326\theta')}{\cos(0,308\theta')} \theta' d\theta' \quad (4.3)$$

donde se ha añadido una constante de normalización a_1 . En cuanto a la zona de la aureola solar, ver Ecuación 2.34, la función distribución de probabilidad viene dada por:

$$F_{CS}(\theta) \approx a_2 2\pi e^k \int_{4,65}^{43,6} \theta'^{(\gamma+1)} d\theta' \quad (4.4)$$

donde también se ha añadido una constante de normalización a_2 . Entonces, la función de distribución de probabilidad total queda de la siguiente forma:

$$F(\theta) = \begin{cases} F_D(\theta) & 0 \leq \theta \leq 4,65 \\ \frac{a_2 2\pi e^k}{\gamma+2} \{\theta^{(\gamma+2)} - 4,65^{(\gamma+2)}\} & 4,65 < \theta \leq 43,6 \end{cases} \quad (4.5)$$

Las constantes de normalización deben cumplir las siguientes condiciones (por definición de $CSR = \chi$)

$$a_1 = \frac{1 - \chi}{2\pi \int_0^{4,65} \frac{\cos(0,326\theta')}{\cos(0,308\theta')} \theta' d\theta'} \quad (4.6)$$

$$a_2 = \frac{\chi}{2\pi e^k \int_{4,65}^{43,6} \theta'^{(\gamma+1)} d\theta'} \quad (4.7)$$

Ahora encontrando la función inversa de $F(\theta)$ obtenemos una expresión para la variable aleatoria deseada haciendo uso del resultado general, Ecuación (4.1):

$$\theta = \begin{cases} F_D^{-1}(\hat{u}) & 0 \leq \hat{u} \leq 1 - \chi \\ \left[\frac{\hat{u}(\gamma+2)}{a_2 2\pi e^k} + 4,65^{(\gamma+2)} \right]^{\frac{1}{\gamma+2}} & 1 - \chi < \hat{u} \leq 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

En la Figura 4.3 se muestra la función distribución de probabilidad obtenida con las Ecuaciones (4.8) para diferentes casos del tamaño de la aureola solar.

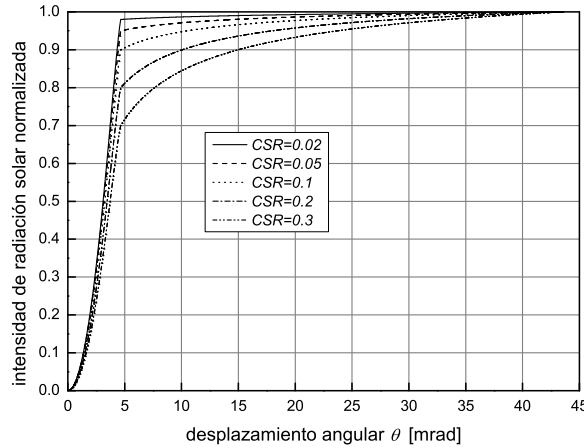


Figura 4.3: Función distribución de probabilidad para un rayo solar desviado un ángulo θ para diferentes valores de CSR

4.2.4. Tipos de materiales

El procedimiento de cálculo de trazado de rayos consiste en emitir un rayo desde la fuente asignado con una energía $\varepsilon = 1$ y vector unitario de dirección \vec{u} . A lo largo de la trayectoria estas cantidades varían en función de las propiedades de las superficies que va impactando. A continuación se describen los cuatro tipos de materiales implementados.

Superficie especular: si un rayo impacta en la parte frontal de una superficie especular, el rayo será reflejado con una probabilidad que viene dada por la reflectancia hemisférica del material $\rho_{2\pi}$, ver Ecuación (2.20). La composición de vectores del vector reflejado idealmente \vec{v} y el vector dispersado \vec{v}' se puede observar en la Figura 2.3. Si el rayo es reflejado se calcula el ángulo de dispersión θ y el nuevo vector director \vec{v}' . La energía asignada al nuevo rayo es $\varepsilon = 1$. Si el rayo no es reflejado o si impacta en la parte posterior de la superficie la energía asignada es $\varepsilon = 0$ y el rayo finaliza la trayectoria. La dispersión especular del espejo se calcula a partir de la función densidad de probabilidad, que se obtiene a partir de la Ecuación (2.18) y haciendo uso de la aproximación de baja dispersión especular $r \approx \theta$ vista en el Capítulo 2. Entonces la función densidad de probabilidad viene dada por la Ecuación (4.9), y el ángulo de dispersión aplicando la expresión (4.1) se muestra en la Ecuación (4.10).

$$f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma_B^2} e^{\frac{-\theta^2}{2\sigma_B^2}} \quad (4.9)$$

$$\theta = \sqrt{-2\sigma_B^2 \ln(\hat{u})} \quad (4.10)$$

El nuevo vector unitario que determina la dirección del rayo después de la reflexión especular se calcula sumando un ángulo de dispersión θ a la dirección de reflexión ideal. La reflexión ideal viene dada por la ley de la reflexión en 3D escrita de manera vectorial, Ecuación (4.11).

$$\vec{v} = \vec{u} - 2\vec{n} \cdot \vec{u} \quad (4.11)$$

donde \vec{n} es el vector normal a la superficie especular. El ángulo azimutal se determina de manera aleatoria, se considera reflexión isotrópica para esta componente.

Superficie opaca: cualquier rayo que impacta en una superficie opaca es absorbida por la superficie y por lo tanto el rayo acaba su trayectoria. Se asigna $\varepsilon = 0$ independientemente del lado de la cara en el que impacta.

Superficie interficie: este tipo de superficie se utiliza para señalar la transición entre dos materiales de índice de refracción diferentes. La ley de Snell escrita de manera vectorial en 3D, Ecuación (4.12), se aplica con el fin de conocer el ángulo transmitido respecto a la normal de la superficie, ver Figura 2.2. Se produce una reflexión o una refracción con una probabilidad que viene dada por los coeficientes de reflexión y refracción calculados a partir

de las ecuaciones de Fresnel, Ecuaciones (2.12) (2.13) (2.14) y (2.15). Si el rayo es reflejado, la ley de la reflexión se aplica y se asigna una energía $\varepsilon = 1$. Si el rayo es refractado se calcula el nuevo vector director aplicando la Ecuación (4.12) y la energía se verá atenuada por el coeficiente de extinción k del material aplicación la Ecuación (2.24). Entonces la nueva energía del rayo es $\varepsilon = \tau_a \varepsilon_0$.

$$n_1 (\vec{u} \times \vec{n}) = n_2 (\vec{v} \times \vec{n}) \quad (4.12)$$

Superficie absorbadora: cuando un rayo impacta con una superficie absorbadora el rayo es absorbido con una probabilidad que viene dada por la Ecuación (2.28) en función del ángulo de incidencia θ_i . Si el rayo es absorbido se suma la energía ε que llevaba, de lo contrario se refleja en una dirección aleatoria simulando una reflexión difusa. Según convenga la parte posterior del material puede ser opaca o absorbadora.

Finalmente, para conocer la energía que llega en el receptor se realiza una suma de las energías de todos los rayos que han impactado en la superficie absorbadora:

$$E_r = \sum_{i=1}^{N_r} \varepsilon_i \quad (4.13)$$

donde N_r es el número de rayos que han impactado en alguna de las superficies absorbadoras. La suma se realiza exclusivamente sobre las superficies absorbadoras.

4.2.5. Eficiencia óptica

Para conocer la eficiencia óptica del sistema cabe conocer la energía que impacta en la apertura del concentrador E_c sin elementos de sombra. Esta energía es la energía aprovechable, y viene dada por la cantidad de rayos que impactan en la apertura del reflector, que es la cantidad de rayos emitidos por unidad de superficie de la fuente solar $\frac{N_r}{A_s}$ multiplicado por la superficie interceptada de la apertura del reflector $\cos(\theta_i) A_c$:

$$E_c = \cos(\theta_i) A_c \frac{N_r}{A_s} \quad (4.14)$$

donde θ_i es el ángulo de incidencia. Así pues, la eficiencia óptica del sistema respecto la energía que llega a la apertura del concentrador viene dada por el cociente:

$$\eta_{opt}(\theta_t, \theta_l) = \frac{E_r}{E_c} = \frac{A_s \sum_{i=1}^{N_r} \varepsilon_i}{\cos(\theta_i) A_c N_r} \quad (4.15)$$

donde se ha expuesto de manera explícita la dependencia angular de la posición del Sol con los ángulos transversal y longitudinal respectivamente.

Antes de la realización de cada uno de los experimentos numéricos, se ha realizado un análisis de convergencia para la determinación del número mínimo de rayos necesario para obtener una variabilidad inferior al 0.5 % en la eficiencia óptica obtenida.

4.3. Condiciones climáticas

Es necesario disponer de un generador de datos climatológicos para conocer la radiación solar y temperatura ambiente en cada intervalo de tiempo en la integración para determinar la eficiencia media anual del FMSC. Se ha utilizado el generador del clima “*Type 109*” del programa TRNSYS (TRNSYS, 2004) para generar los valores de radiación global, radiación directa, radiación difusa y temperatura ambiente con un paso de 0.1 hora durante un año. El *Type 109* necesita un fichero con datos climatológicos horarios de un año típico. Estos valores han sido obtenidos de la asociación americana ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) a través de la página web del *U.S. Department of Energy* ASHRAE (2011). El formato de los ficheros es del tipo *EPW* (*Energy Plus Weather*) cuyos datos provienen de los ficheros generados para un año típico *TMY2* (*Typical Meteorological Year 2*) NREL (2011).

Los conjuntos de datos de los ficheros *TMY2* son los valores horarios de la radiación solar y de los elementos meteorológicos de un período de un año. El uso previsto de estos ficheros es para realizar simulaciones por ordenador de sistemas solares de conversión de energía y para la simulación de edificios, con el objeto de facilitar las comparaciones de rendimiento de los distintos tipos de sistemas, configuraciones y ubicaciones. No son adecuados para el diseño de sistemas para satisfacer las condiciones más desfavorables o extremas. Se trata de un año típico para cada localidad considerada. En la Figura 4.4 se expone el programa en TRNSYS utilizado para la generación del clima en pasos de 0.1 hora.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento térmico del concentrador solar FMSC, se han considerado tres localidades diferentes, cada una a latitudes diferentes: Palma de Mallorca (Lat=39.5°N), Múnich (Lat=48.1°N), y El Cairo (Lat=30.1°N). Los climas considerados tienen una irradiación horizontal anual de 1647 kWh/m^2 para Palma de Mallorca, 1912 kWh/m^2 para El Cairo, y 1123 kWh/m^2 para Múnich. En la Figura 4.5 se muestran los valores mensuales de la radiación directa y difusa en un plano inclinado 15° y orientación Sur, y la temperatura media mensual durante las horas de Sol para cada una de las localidades. En la Tabla 4.1 se muestran valores promedio anuales para cada localidad.

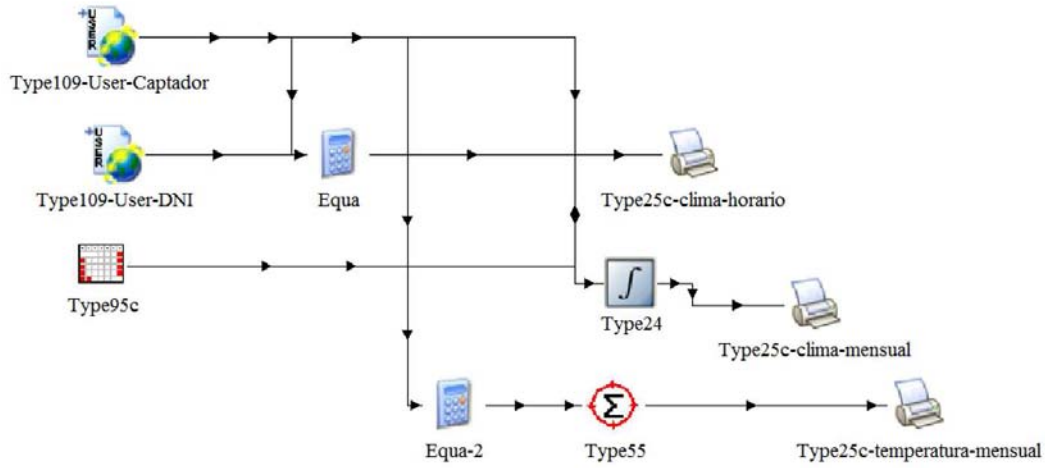


Figura 4.4: Programa en TRNSYS para generar los datos climatológicos. Dos generadores del clima *Type 109* sirven para determinar la irradiación en el plano del captador (inclinación 15° y orientación Sur), y para determinar la irradiación directa normal al Sol (DNI). Se guardan valores cada 0.1 hora y promedios mensuales en ficheros de salida

	El Cairo	Palma de Mallorca	Múnich
$G_{Hb} [kWh/m^2]$	1266	977	500
$G_{Hd} [kWh/m^2]$	646	670	623
$DNI [kWh/m^2]$	1863	1551	855
$G_T [kWh/m^2]$	2064	1817	1228
$G_{Tb} [kWh/m^2]$	1384	1110	582
Fracción difusa H	31 %	37 %	51 %
$T_a [^\circ C]$	23.5	19.0	9.4

Tabla 4.1: Valores climáticos promedio anuales: G_{Hb} irradiancia directa horizontal, G_{Hd} irradiancia difusa horizontal, DNI irradiancia directa normal al Sol, G_T irradiancia total en el plano del captador (plano inclinado 15°), G_{Tb} irradiancia directa en el plano del captador (plano inclinado de 15°), fracción de irradiancia difusa en el plano horizontal, y temperatura ambiente en horas de Sol.

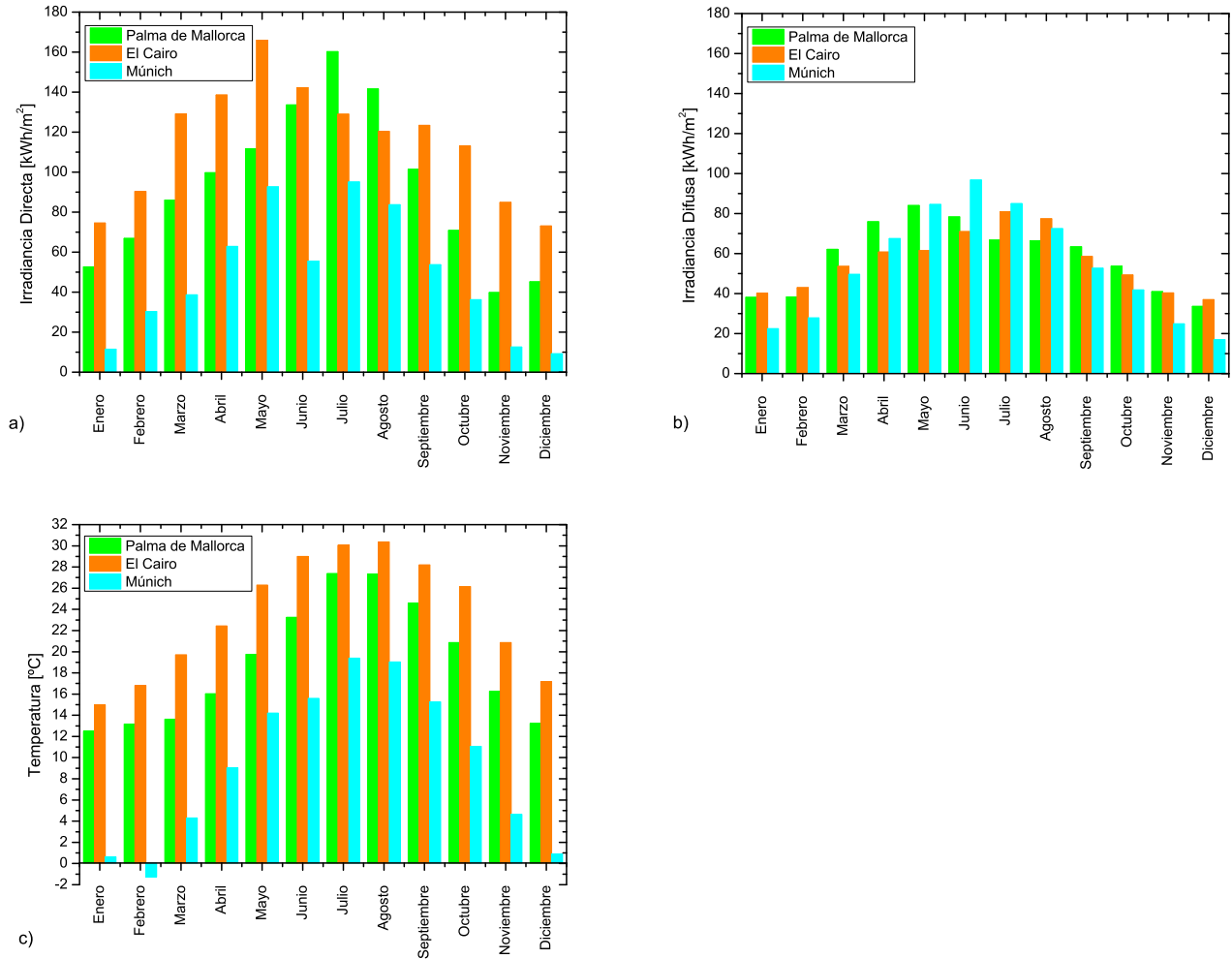


Figura 4.5: Datos climatológicos de las tres localidades consideradas: a) Irradiancia directa mensual en un plano inclinado 15° y orientación sur. b) Irradiancia difusa mensual en un plano inclinado 15° y orientación sur. c) Temperatura media mensual durante las horas de Sol.

4.4. Ángulos de posicionamiento solar respecto al concentrador

Se dispone de una herramienta para el comportamiento óptico del concentrador (*ray-tracing*) y otra para conocer los datos climatológicos durante un año típico. A continuación se describe el método para conocer los ángulos de posición solar respecto al concentrador solar. En primer

4.4. ÁNGULOS DE POSICIONAMIENTO SOLAR RESPECTO AL CONCENTRADOR 55

lugar se define la posición del concentrador solar respecto a las coordenadas locales. Esto se realiza mediante las siguientes tres rotaciones (respetando el orden expuesto), utilizando los ángulos de Tait–Bryan, véase la Figura 4.6:

1. Rotación de un ángulo γ_c alrededor del eje vertical L_γ
2. Rotación de un ángulo α_c alrededor del eje longitudinal L_α
3. Rotación de un ángulo β_c alrededor del eje transversal L_β

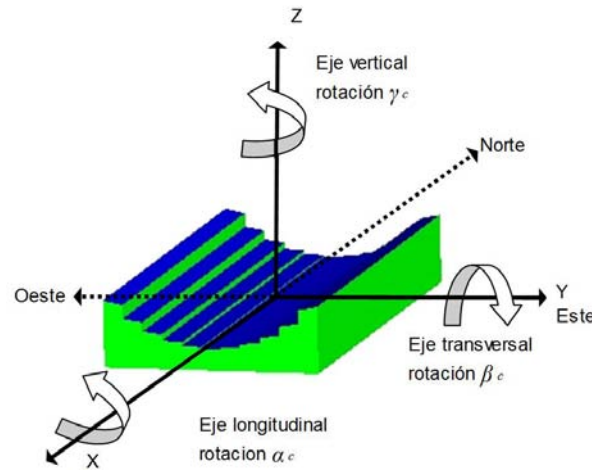


Figura 4.6: Rotaciones para determinar la orientación del concentrador solar respecto al sistema local de coordenadas

Mediante la transformación de coordenadas por rotación se pueden encontrar los ángulos solares relativos al concentrador en función de los ángulos α_c , β_c , γ_c . Las matrices de transformación en coordenadas cartesianas para cada una de las rotaciones se muestran en las igualdades (4.16-4.18).

$$L_\gamma = \begin{pmatrix} \cos\gamma_c & -\sin\gamma_c & 0 \\ \sin\gamma_c & \cos\gamma_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

$$L_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_c & -\sin\alpha_c \\ 0 & \sin\alpha_c & \cos\alpha_c \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

$$L_\beta = \begin{pmatrix} \cos\beta_c & 0 & -\sin\beta_c \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta_c & 0 & \cos\beta_c \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

La matriz global $L_{\beta\alpha\gamma}$ para la transformación en coordenadas cartesianas viene dada por la siguiente expresión:

$$L_{\beta\alpha\gamma} = L_{\beta} \bullet L_{\alpha} \bullet L_{\gamma} = \begin{pmatrix} \cos\gamma_c \cos\beta_c + \sin\gamma_c \sin\alpha_c \sin\beta_c & -\sin\gamma_c \cos\beta_c + \cos\gamma_c \sin\alpha_c \sin\beta_c & -\cos\alpha_c \sin\beta_c \\ \sin\gamma_c \cos\alpha_c & \cos\gamma_c \cos\alpha_c & \sin\alpha_c \\ \cos\gamma_c \sin\beta_c - \sin\gamma_c \sin\alpha_c \cos\beta_c & -\sin\gamma_c \sin\beta_c - \cos\gamma_c \sin\alpha_c \cos\beta_c & \cos\alpha_c \cos\beta_c \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

Aplicando esta matriz de transformación a un vector posición del Sol en coordenadas cartesianas $\vec{u}_S = (x, y, z)$ se encuentra la nueva posición del Sol respecto al concentrador solar \vec{u}'_S . Los ángulos de posicionamiento del Sol relativos al concentrador θ_t y θ_l , ángulos transversal y longitudinal respectivamente, se determinan a partir de las expresiones (4.20), (4.21) y (4.22).

$$\vec{u}'_S = L_{\beta\alpha\gamma} \otimes \vec{u}_S \quad (4.20)$$

$$\theta_t = \text{atan} \left(\frac{y'}{z'} \right) \quad (4.21)$$

$$\theta_l = \text{atan} \left(\frac{x'}{z'} \right) \quad (4.22)$$

siendo las componentes del vector $\vec{u}'_S = (x', y', z')$. Se ha tomado la dirección x para el eje axial, la dirección y para el eje transversal y la dirección z para el eje vertical. Ver Figura 2.6.

4.5. Eficiencia térmica del concentrador solar

Como receptor se ha considerado un tubo evacuado con aleta plana de flujo directo coaxial. Se ha tomado como referencia los coeficientes de la curva característica de un colector formado por 10 tubos evacuados de aleta plana. La información que se detalla a continuación ha sido extraída del informe (TÜV, 2008). El material selectivo del tubo de vacío es el fabricado por la empresa TINOX (<http://www.almeco-tinox.com/en/>). Los coeficientes para la eficiencia térmica de ganancia y pérdidas respecto superficie absorbedora son los siguientes:

$$a_0 = F_{av} (\tau\alpha)_0 = 0.859$$

$$a_1 = 1.214 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$a_2 = 0.00435 \text{ W/m}^2 \text{ K}^2$$

Si bien estos coeficientes de pérdidas están referenciados a superficie absorbadora, cabe tener en cuenta que la parte posterior de la aleta es de cobre pulido cuya emitancia es del 3.9 % (Rohsenow and Hartnett, 1973) similar al material absorbedor TINOX del 4 % para el rango de temperaturas de 100°C. Entonces resulta que las pérdidas térmicas por unidad de superficie absorbadora para una aleta plana que capturara energía por ambos lados son la mitad, dado que se dispone del doble de superficie absorbadora y la emitancia es la misma para ambos materiales (la mayor fuente de pérdidas térmicas en tubos evacuados se produce por radiación del absorbedor (Duffie and Beckman, 1991; Winter et al., 1991)).

Por todo ello, en cuanto al FMSC, se ha considerado una aleta plana que captura energía por ambos lados. Con esta configuración se aprovecha la energía en incidencia normal por la cara posterior, y por tanto no se producen sombras del receptor sobre la superficie reflectora. Entonces, despreciando la irradiancia difusa, la ecuación de rendimiento térmico para el FMSC viene dada por:

$$\eta_B = F_{av} (\gamma \rho \tau \alpha)_0 (K_{\gamma \rho \tau \alpha})_b - a'_1 \frac{(T_{av} - T_a)}{G_b} - a'_2 \frac{(T_{av} - T_a)^2}{G_b} \quad (4.23)$$

donde los coeficientes de pérdidas están relacionados con los coeficientes del captador considerado y la concentración geométrica (Winter et al., 1991; Duffie and Beckman, 1991):

$$a'_1 = \frac{a_1}{2} \frac{1}{C_g} \quad (4.24)$$

$$a'_2 = \frac{a_2}{2} \frac{1}{C_g} \quad (4.25)$$

En cuanto al coeficiente de transferencia de calor F_{av} , mediante el programa de *ray-tracing* se ha calculado el producto $(\tau \alpha)_0$ dando un valor de 0.904 para el tubo evacuado tomado de referencia. Para este cálculo, se han considerado las cotas reales del tubo de vidrio con 55 mm de diámetro y un espesor de 1.8 mm. El coeficiente de extinción para el vidrio considerado es de $k = 4m^{-1}$. El vidrio lleva un recubrimiento antirreflectante por ambas caras. Este efecto se ha supuesto considerando un coeficiente de refracción de $n = 1.25$, Ecuación (2.26). Así pues, conociendo el resultado $F_{av} (\tau \alpha)_0 = 0.859$ del informe de ensayos (TÜV, 2008), se obtiene un coeficiente de transferencia de calor $F_{av} = \frac{0.859}{0.904} = 0.95$.

Por falta de información sobre el comportamiento térmico del captador a temperaturas superiores a los 100°C, se considera que los coeficientes de pérdida (Ecuaciones (4.24) y (4.25)) se mantienen constantes en función de la temperatura, así como el factor $F_{av} = 0.95$.

En resumen, y en los sucesivos Capítulos, se han considerado las siguientes expresiones para la potencia útil por unidad de superficie de apertura, y el rendimiento térmico del FMSC respectivamente:

$$\frac{\dot{Q}_g}{A_a} = 0,95 (\gamma \rho \tau \alpha)_0 (K_{\gamma \rho \tau \alpha})_b G_b - \frac{1,214}{2C_g} (T_{av} - T_a) - \frac{0,00435}{2C_g} (T_{av} - T_a)^2 \quad (4.26)$$

$$\eta_B = 0,95 (\gamma \rho \tau \alpha)_0 (K_{\gamma \rho \tau \alpha})_b - \frac{1,214}{2C_g} \frac{(T_{av} - T_a)}{G_b} - \frac{0,00435}{2C_g} \frac{(T_{av} - T_a)^2}{G_b} \quad (4.27)$$

Los captadores de flujo directo coaxial pueden presentar una disminución de la eficiencia entre el 2 % y el 4 % debido al acoplamiento entre la entrada y el retorno (Glembin et al., 2010), así pues si para el FMSC se diseñara un receptor mejorando el factor F_{av} las ganancias \dot{Q}_g aumentarían proporcionalmente. Pero dado que no forma parte de este estudio diseñar un receptor para el FMSC, se ha optado por mantener el valor $F_{av} = 0.95$ calculado sin repercutir al resultado de la optimización paramétrica comparativa que se ha realizado en los Capítulos 5 y 6.

4.6. Conclusiones

El método denominado *ray-tracing* permite calcular tanto la energía captada como su distribución en el receptor de manera precisa en función de las propiedades ópticas de los materiales y el tamaño angular del Sol. Este es el método más apropiado para calcular el comportamiento óptico del FMSC dada su geometría escalonada, y la multitud de formas que puede adoptar el concentrador solar según los parámetros de diseño.

Se ha implementado un *forward-ray-tracing* para el estudio de sistemas solares de concentración, y se dispone de una herramienta de cálculo para determinar la eficiencia térmica del FMSC para cualquier orientación con datos climatológicos fiables.

Capítulo 5

Análisis del FMSC

La finalidad de este análisis es conocer la influencia de los parámetros de diseño tanto en el IAM como en la eficiencia térmica del FMSC. Se presentan las curvas del modificador de ángulo IAM, se discute su factorización para otras posiciones del Sol, se analiza la distribución de radiación en el receptor, y se determina la eficiencia térmica anual para tres localidades a diferentes latitudes. La temperatura de trabajo considerada del fluido caloportador es de 200°C.

5.1. Objetivos

Los objetivos son (geometría FMSC):

- Calcular la eficiencia óptica en incidencia normal
- Calcular las curvas IAM para diferentes valores de los parámetros de diseño y analizar su factorización
- Conocer la distribución de radiación en el receptor
- Determinar la eficiencia térmica integrada anual para diferentes valores de los parámetros de diseño
- Conocer la influencia de la orientación NS y EO en el comportamiento del concentrador

5.2. Casos analizados

La geometría del FMSC depende de dos parámetros N y F/W . Combinaciones de estos dos parámetros conllevan a multitud de posibilidades para la geometría del reflector. Con

la finalidad de acotar el número de casos, es necesario acotar los valores que toman los parámetros de diseño. Se consideran los siguientes rangos de valores:

Número de espejos: $N=5, 7, 9, \dots, 51$

Cociente Foco/Amplitud: $F/W=1.0, 1.25, 1.5, \dots, 3.0$

Si bien con estos dos parámetros la forma del reflector queda totalmente determinada, para definir el concentrador solar completo es necesario determinar el tamaño del receptor. En el Capítulo 4 se ha descrito el tipo de receptor considerado para analizar el FMSC, pero la amplitud de la aleta absorbadora está aun por definir. Para ello se ha añadido otro parámetro de diseño, el factor de intercepción γ , definido en la Ecuación (2.57). Antes de ver cómo afecta este parámetro, es necesario discutir sobre la calidad especular del reflector.

La desviación especular de los rayos reflejados por los espejos viene caracterizada por la desviación σ_B de la Ecuación (2.21), y es una combinación de las siguientes fuentes de error : error en la inclinación de los espejos σ_s , error debido a la no especularidad por efectos microscópicos σ_m , error debido al mecanismo de seguimiento solar σ_t , y error en la alineación de los espejos σ_a . Cabe tener en cuenta que se debe añadir un factor 2 en el término del error ocasionado por la inclinación de los espejos debido a la ley de la reflexión:

$$\sigma_B = \sqrt{(2\sigma_s)^2 + \sigma_m^2 + \sigma_t^2 + \sigma_a^2} \quad (5.1)$$

Buie (2005) da valores típicos para cada una de las fuentes de error. Valores típicos para σ_s suelen estar comprendidos entre 1-6 mrad, y tanto σ_m como σ_a suelen tomar valores inferiores a 1 mrad. En cuanto al error para el mecanismo de seguimiento solar, y para el caso del FMSC, se ha considerado un posicionamiento del receptor con una tolerancia de 0.1° , entonces el valor de σ_t es de 0.87 mrad para el caso de incidencia normal.

Con el objetivo de considerar la calidad óptica del concentrador una vez construido, se considera que la desviación estándar para la dispersión especular global de los espejos toma un valor de $\sigma_B=8$ mrad, que correspondería a los siguientes valores según la fuente del error: $\sigma_s=4$ mrad, $\sigma_m=0.5$ mrad, $\sigma_t=0.87$ mrad, y $\sigma_a=0.5$ mrad. Para su comparación, en la literatura se puede encontrar un valor de $\sigma_B=7.75$ mrad para el concentrador cilindro-parabólico *Euro Trough/LS3* (Lüpfert et al., 2007).

En cuanto al tamaño del receptor, si se considera que el ancho de la aleta absorbadora es tal que la concentración de aperturas es igual al número de espejos, $A_r = \frac{1}{N}$, el factor de intercepción γ en incidencia normal toma un valor bajo (ver Figura 5.1). Entonces es necesario agrandar el tamaño del receptor y extenderlo tanto como sea necesario para interceptar una cantidad mayor de energía. Un ejemplo puede verse en la Figura 5.1 para el caso de $N=25$ y $F/W=1.0$. Se puede observar que para $\gamma=0.995$ (no se considera 1 porque supondría una extensión desmesurada del receptor) es necesario incrementar el receptor 0,079 u , para $\gamma=0.96$ el receptor se incrementa 0,024 u , y finalmente para $\gamma=0.92$ tan sólo se incrementa 0,017 u .

El ratio de aperturas son, respectivamente, $C_a = 8.4$, 15.6 y 17.5. En la Figura también se muestra el caso en el que ancho del receptor es $A_r = \frac{1}{N}$, esto es $a = \frac{1}{25}$, alcanzando un ratio de apertura elevada, obviamente de $C_a = 25$, pero con un factor de intercepción bajo $\gamma = 0.82$ tal y como se ha mencionado al inicio de esta discusión.

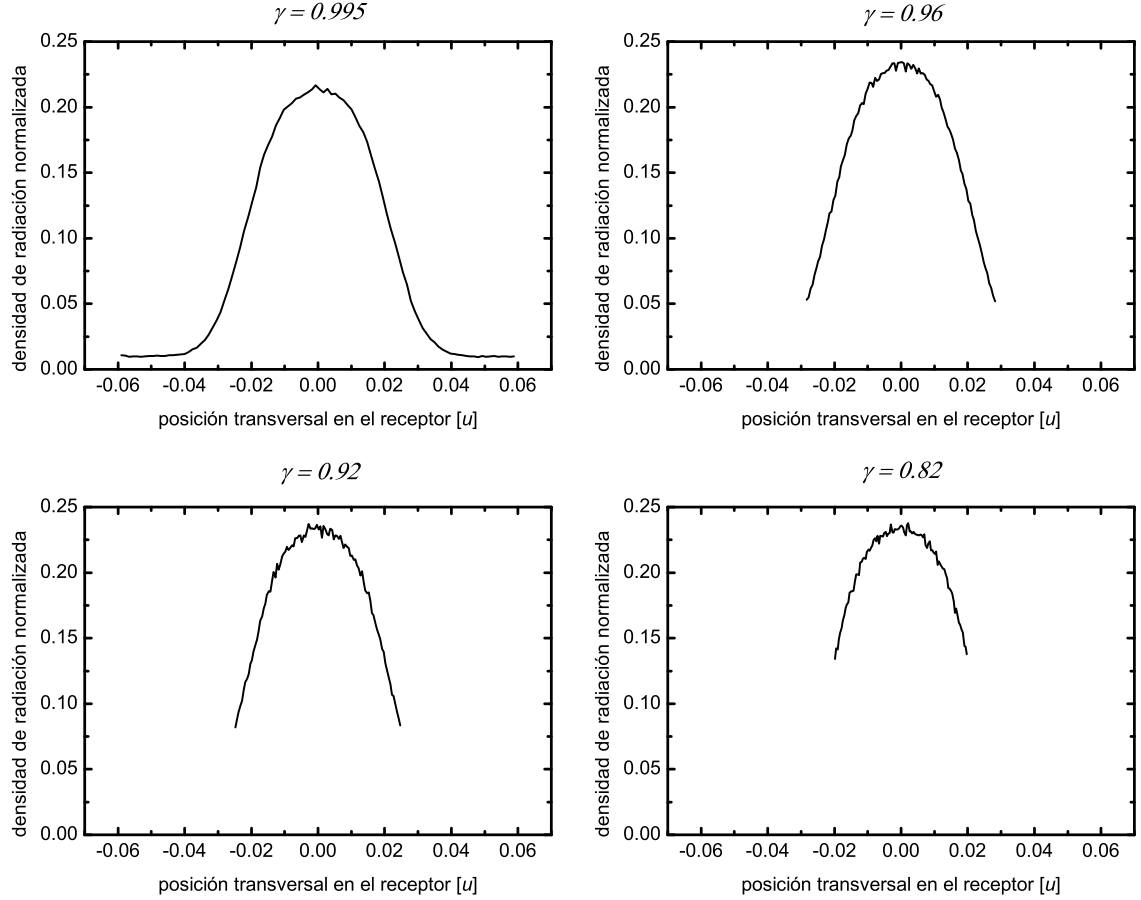


Figura 5.1: Densidad de radiación normalizada en la superficie del absorbedor para el caso $N=25$, $F/W=1.0$, $\sigma_B=8$ mrad y $CSR=0.05$ para diferentes valores del factor de intercepción y para el caso $A_r = \frac{1}{25}$ ($\gamma=0.82$). La apertura W y la longitud axial del concentrador han sido considerados como $1u$. Se ha considerado $\rho_{2\pi}=1$ y un absorbedor ideal. El cálculo se ha realizado con *ray-tracing* con la emisión de un millón de rayos y el receptor ha sido discretizado en 500 segmentos transversales.

A la vista de este análisis, es necesario añadir el factor de intercepción γ como parámetro de diseño, ya que a priori se desconoce qué valor de γ puede dar lugar a un óptimo en la captación solar. Valores cercanos a uno implica mayor energía capturada, pero también

menor factor de concentración. Por otro lado valores típicos de γ están comprendidos en el rango 0.90-0.99 (como por ejemplo el prototipo cilindro-parabólico Eurotrough-II construido en la Plataforma Solar de Almería (Riffelmann et al., 2006)). Así pues, para el cálculo de los modificadores de ángulo IAM se van a considerar los diferentes valores $\gamma = 0.92, 0.94, 0.96$ y 0.98 .

Por todo ello, los casos que se van a analizar son todas las combinaciones que vienen dadas por:

- Número de espejos: $N = 5, 7, 9, \dots, 51$
- Ratio Foco/Amplitud: $F/W = 1.0, 1.25, 1.5, \dots, 3.0$
- $\gamma = 0.92, 0.94, 0.96, 0.98$

En cuanto al tamaño angular del Sol, se ha caracterizado con un valor de $CSR = 0.05$. Valores $CSR < 0.05$ dominan en el rango de $400\text{--}1200\text{ W/m}^2$ para la radiación directa (Neumann et al., 2002).

La apertura del receptor se corresponde con el mínimo ancho de tal forma que se intercepte el valor de γ deseado para cada par de valores de N y F/W . Se ha utilizado el programa de *ray-tracing* para determinar el ancho del receptor. En este experimento 100000 rayos fueron emitidos. Se ha supuesto un receptor ideal ($\alpha = 1$) sin cubierta de vidrio, ya que se pretende buscar exclusivamente el efecto de intercepción de energía en la superficie absorbadora. Se ha supuesto que el receptor intercepta radiación por ambas caras. Así pues el ratio de aperturas es el doble de la concentración geométrica $C_a = 2C_g$. La concentración geométrica está relacionada con las pérdidas térmicas del receptor, ver Ecuación (4.26).

En la Figura 5.2 se expone la concentración geométrica para todos los valores de N , F/W y γ escogidos. La concentración geométrica máxima que se puede alcanzar es de 14, correspondiente al valor más grande del número de espejos, $N = 51$, y a los valores más pequeños de los otros dos parámetros, $F/W = 1.0$ y $\gamma = 0.92$. Este valor de $C_g = 14$, que es muy inferior al valor de 25.5 para el caso ideal, es muy sensible al valor de $\sigma_B = 8$ mrad escogido. Notar que el valor aquí tomado para la desviación especular en los espejos $\sigma_B = 8$ mrad corresponde a una calidad media del concentrador solar una vez construido.

Se puede observar que a medida que N aumenta la concentración geométrica también aumenta, tal y como se esperaba. En cuanto a la dependencia en el parámetro F/W , a medida que aumenta el valor de F/W la concentración disminuye. Esto es debido a que cuanto más alejado se encuentra el receptor más afecta la dispersión angular de los espejos. Por último, a medida que γ aumenta la concentración geométrica disminuye. Se observa que para valores de $F/W \geq 2.0$ las curvas son casi planas a partir de un cierto valor del número de espejos. Diseños con valores de N en la zona plana dejan de tener interés, ya que se complica la geometría al tener más espejos y no se consigue una concentración mayor.

En la Tabla 5.1 se muestran los valores que toman cada uno de los parámetros de diseño, y en la Tabla 5.2 se muestra el rango de valores que toma la concentración de aperturas. En total 791 casos han sido calculados. Para $F/W \geq 2.5$ no es posible alcanzar los factores de intercepción más elevados a partir de cierto valor del número de espejos, por lo que las curvas correspondientes no cubren todo el rango de N para el valor de $\sigma_B=8$ mrad considerado.

En base a los resultados obtenidos en este experimento numérico, se ha podido estimar que el error absoluto para γ es de 0.3 % con una fiabilidad del 94 %.

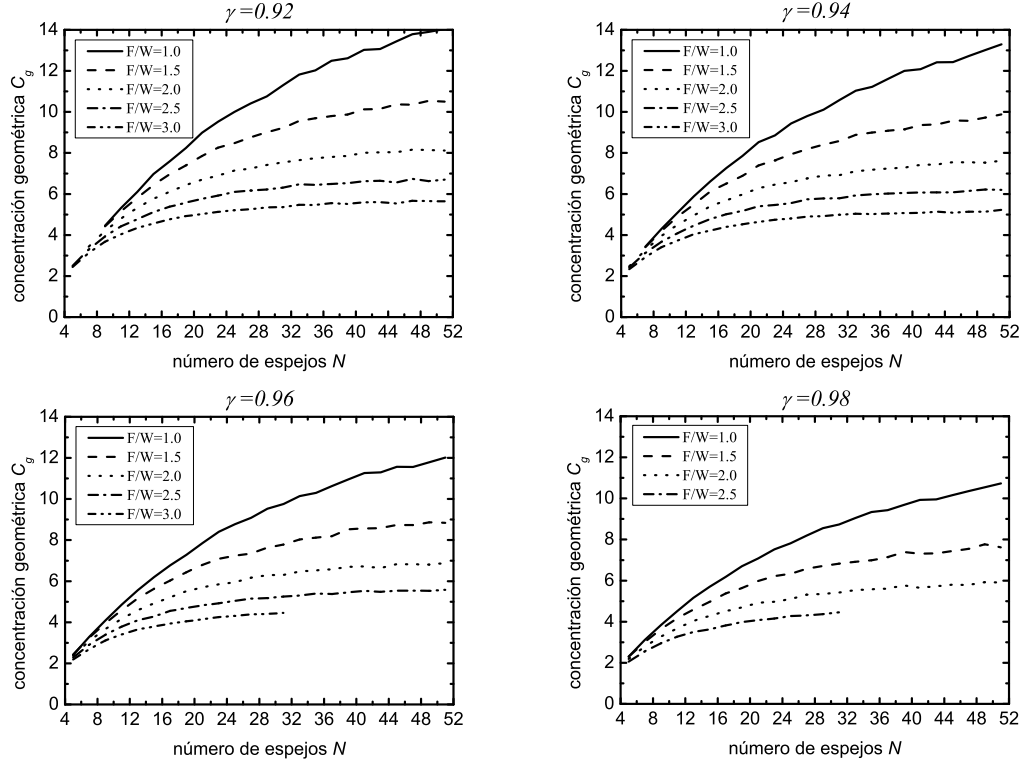


Figura 5.2: Concentración geométrica en función del número de espejos para diferentes valores de F/W y γ

γ	$F/W=1.0$	$F/W=1.25$	$F/W=1.5$	$F/W=1.75$	$F/W=2.0$	$F/W=2.25$	$F/W=2.5$	$F/W=2.75$	$F/W=3.0$
0.92	9 - 51	9 - 51	9 - 51	7 - 51	7 - 51	7 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51
0.94	7 - 51	7 - 51	7 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51
0.96	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 31
0.98	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 51	5 - 31	5 - 13	

Tabla 5.1: Rango de valores que toma el número de espejos N para diferentes valores de γ y F/W considerando $\sigma_B=8$ mrad y tamaño angular del Sol $CSR=0.05$

γ	$F/W=1.0$	$F/W=1.25$	$F/W=1.5$	$F/W=1.75$	$F/W=2.0$	$F/W=2.25$	$F/W=2.5$	$F/W=2.75$	$F/W=3.0$
0.92	8.9 - 28.1	9.0 - 24.6	8.8 - 21.1	7.0 - 18.6	6.9 - 16.3	6.7 - 14.8	5.0 - 13.5	5.0 - 12.3	4.9 - 11.3
0.94	5.0 - 26.6	6.9 - 22.9	6.8 - 19.8	5.0 - 17.1	5.0 - 15.2	4.9 - 13.7	4.8 - 12.4	4.7 - 11.3	4.7 - 10.5
0.96	5.0 - 24.0	4.9 - 20.6	4.8 - 17.7	4.8 - 15.5	4.7 - 13.8	4.7 - 12.4	4.6 - 11.2	4.5 - 10.1	4.4 - 8.9
0.98	4.6 - 21.5	4.7 - 18.0	4.6 - 15.5	4.5 - 13.4	4.4 - 11.9	4.2 - 10.4	4.1 - 8.9	4.0 - 6.6	

Tabla 5.2: Rango de valores que toma la concentración de aperturas C_a para diferentes valores de γ y F/W considerando $\sigma_B=8$ mrad y tamaño angular del Sol $CSR=0.05$

Lo expuesto hasta el momento determina la geometría del reflector y la apertura de la superficie absorbidora. En cuanto al receptor, tal como se ha expuesto en el Capítulo 4, se ha considerado un receptor de tipo tubo evacuado con aleta plana. La aleta puede capturar energía por ambas caras. El vidrio considerado tiene un índice de refracción de $n=1.526$, un espesor de $0.0018 u$ (recordemos que la unidad de longitud es $1 u$ igual a la amplitud del receptor $W=1 u$), y una distancia de separación entre la aleta y el vidrio de $0.0045 u$, ver Figura 5.3. Para estas cotas se ha tomado como referencia el tubo de vacío del captador analizado en (TÜV, 2008) si la unidad $W=1 u = 1$ metro.

La dependencia angular en la absorptividad se ha caracterizado por los coeficientes $\alpha_0=0.95$, $b=0.017$ y $c=1.8$ (Tsfamichael and Wäckelgård, 2000), Ecuación (2.28). La aleta del receptor se orienta siempre hacia el punto medio del espejo central, entonces es preciso realizar una rotación del receptor en función de la posición del Sol, ver Figura 4.1 donde se aprecia la rotación del absorbedor sobre sí mismo. El ángulo rotado coincide con el ángulo de incidencia solar. En cuanto a la reflectividad global de los espejos se ha considerado $\rho_{2\pi}=0.92$, Ecuación (2.20).

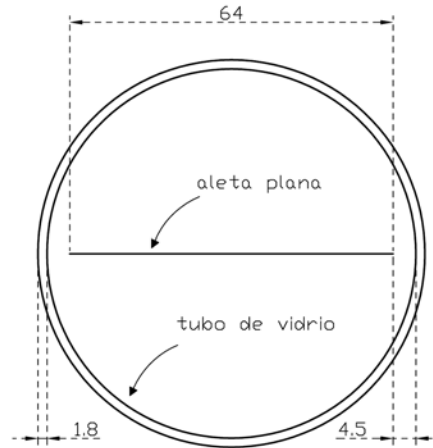


Figura 5.3: Dimensiones del tubo evacuado considerado en unidades $1000 \times u$ para el caso de $\gamma=0.98$, $N=25$ y $F/W=1.0$

5.3. Análisis óptico del FMSC. Resultados y discusión

La eficiencia óptica respecto radiación directa viene dada por la Ecuación (4.15), donde se especifica la dependencia angular de los ángulos solares. A partir de esta expresión puede calcularse la eficiencia óptica para las componentes paralela y perpendicular al eje axial del concentrador solar. El modificador de ángulo IAM para la componente transversal viene dado por la Ecuación (5.2), y para la componente paralela por la Ecuación (5.3).

$$K_t = \frac{\eta_{opt}(\theta_t, 0)}{\eta_{opt}(0, 0)} \quad (5.2)$$

$$K_l = \frac{\eta_{opt}(0, \theta_l)}{\eta_{opt}(0, 0)} \quad (5.3)$$

5.3.1. Eficiencia óptica

En la Figura 5.4 se muestra la eficiencia óptica en incidencia normal para todos los casos analizados, en este cálculo numérico mediante *ray-tracing* se han emitido 200000 rayos para cada uno de los casos. Se observa una fuerte dependencia con el factor de intercepción. La eficiencia óptica media para $\gamma = 0.92, 0.94, 0.96$ y 0.98 son $0.731, 0.748, 0.765$ y 0.782 respectivamente. Se observa un incremento del 2.3% relativo cada vez que se aumenta el factor de intercepción en un 2% absoluto. Este hecho implica que diseños con $\gamma = 0.96$ y 0.98 son diseños que capturan más energía a pesar de no alcanzar concentraciones tan elevadas como los casos de $\gamma = 0.92$ y 0.94 . No se ha considerado el factor $F_{av}=0.95$.

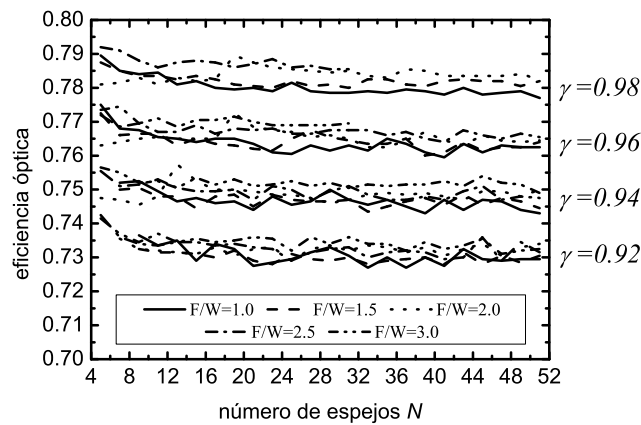


Figura 5.4: Eficiencia óptica en incidencia normal en función del número de espejos para diferentes valores de los parámetros de diseño adoptados

5.3.2. IAM transversal

Para el cálculo del modificador de ángulo transversal K_t , se han emitido 200000 rayos para cada posición del Sol en el rango de 0° - 80° en pasos de 1° . La simulación se realiza en 3D, la longitud axial del concentrador considerada es $L=1$ u. Debido al gran número de casos calculados, en las Figuras 5.5, 5.6, y 5.7 se muestra una selección de las curvas obtenidas con la finalidad de analizar los efectos de cada uno de los parámetros de diseño.

En la Figura 5.5 se muestran los efectos del parámetro F/W . Se puede observar que a medida que F/W aumenta se obtiene un mayor IAM transversal. La influencia del factor F/W en el IAM transversal es bastante fuerte, ya que para $F/W=1.0$ la curva disminuye drásticamente entre los ángulos de incidencia 50° - 60° mientras que para $F/W=3.0$ se mantiene por encima de uno en prácticamente todos los casos expuestos, lo que supone una captación de la energía del 100 %. Esto se debe a que valores grandes de F/W implican pequeñas alturas en los escalones del reflector, así los rayos interceptan con poca frecuencia en dichos escalones. Cabe destacar que cuando el receptor intersecciona con el reflector deja de realizar el seguimiento solar (ángulo $\theta_{f,LIM}$ de la Ecuación (3.10)), esto puede observarse por ejemplo para $F/W = 1.0$ en el descenso pronunciado de las curvas a partir de los 48° en el ángulo transversal. Este efecto es más pronunciado para F/W pequeños, ya que la altura h del reflector es mayor (Figura 3.11c) y por tanto $\theta_{f,LIM}$ menor. Notar también que en algunos casos el IAM transversal es superior a la unidad, esto se debe a que el receptor, una vez posicionado fuera de la proyección de la apertura del reflector, captura energía directamente del Sol incrementando así la energía interceptada respecto a la apertura del reflector. Este efecto se aprecia para valores de $F/W \geq 1.5$ y para ángulos de incidencia transversal grandes.

En la Figura 5.6 se analiza el efecto del número de espejos N en el IAM transversal, se puede observar que si se aumenta el número de espejos el IAM transversal decrece. Esto se debe a que el número de escalones aumenta al aumentar el número de espejos, por consiguiente algunos rayos quedan interceptados antes de llegar al receptor. Esta disminución es muy pronunciada al pasar de 5 a 15 espejos, después al incrementar el valor de N no se observa una disminución relativa tan elevada (o bien al pasar de 9 a 19 espejos según la gráfica que se observe). El efecto del parámetro N no es tan pronunciado como el visto anteriormente en el caso de F/W .

Finalmente, en la Figura 5.7 se analiza el efecto del factor de intercepción γ . Se observa que sus efectos en el IAM transversal son prácticamente despreciables.

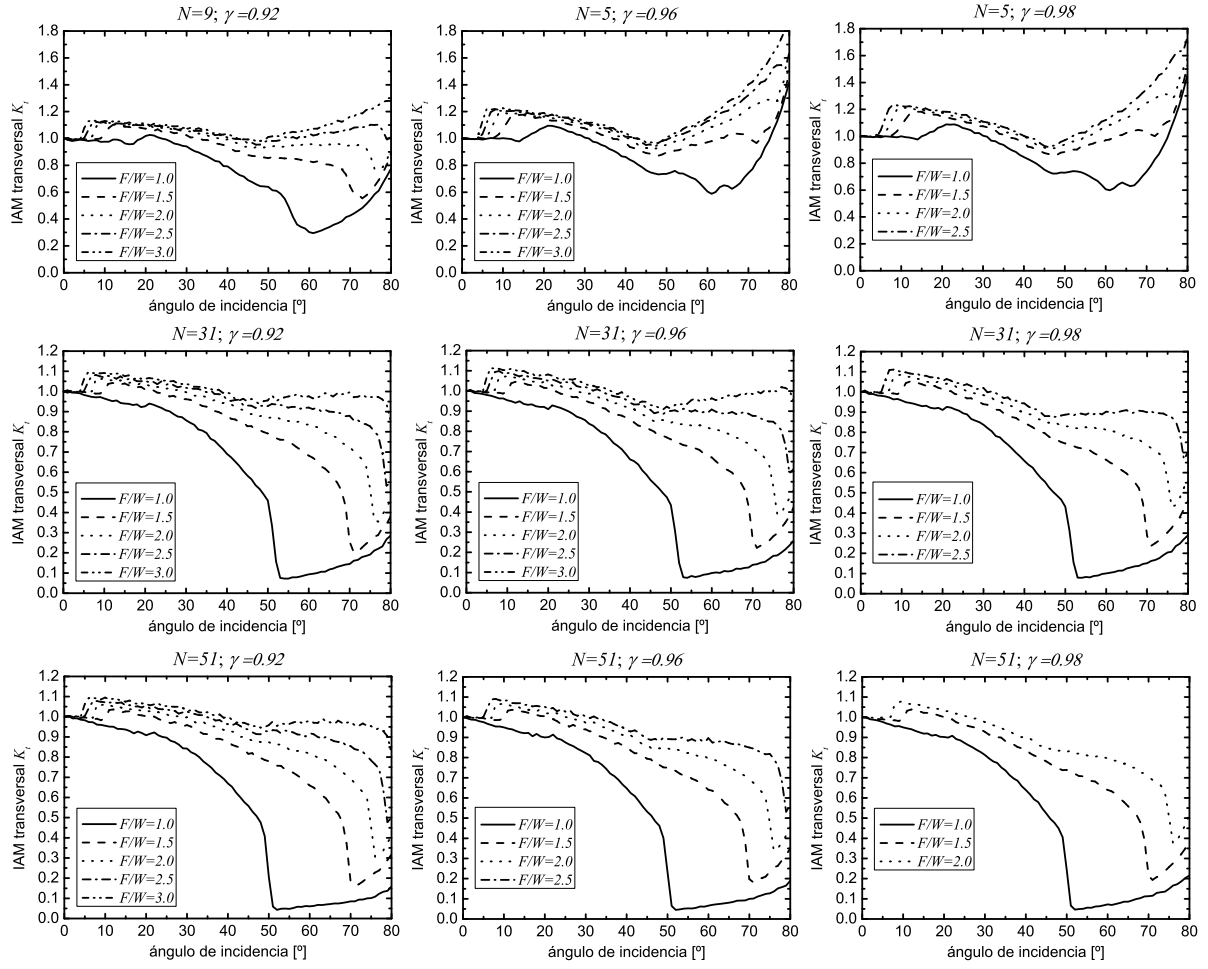


Figura 5.5: Curvas del IAM transversal dependiendo del valor de F/W para diferentes valores de N y γ

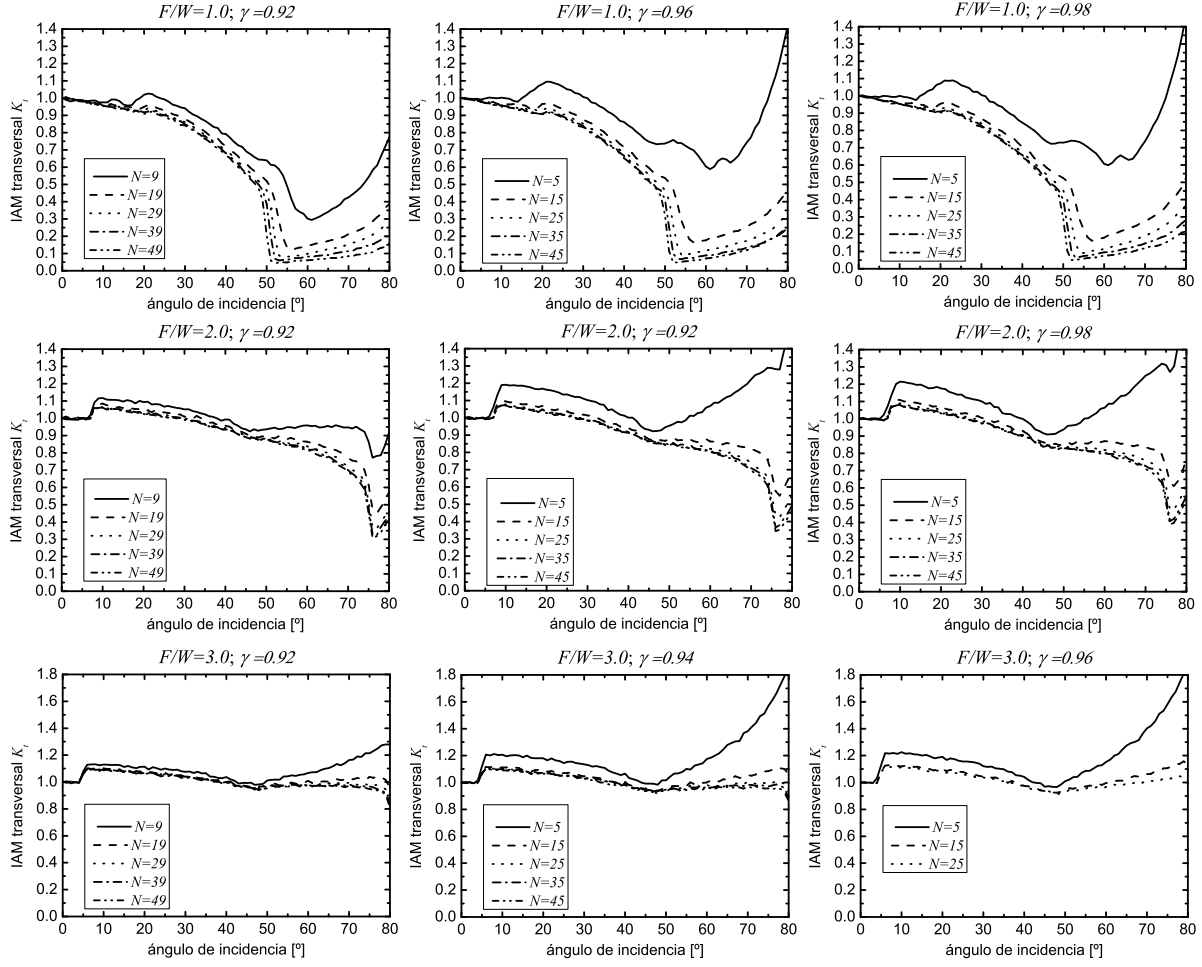


Figura 5.6: Curvas del IAM transversal dependiendo del número de espejos N para diferentes valores de F/W y γ

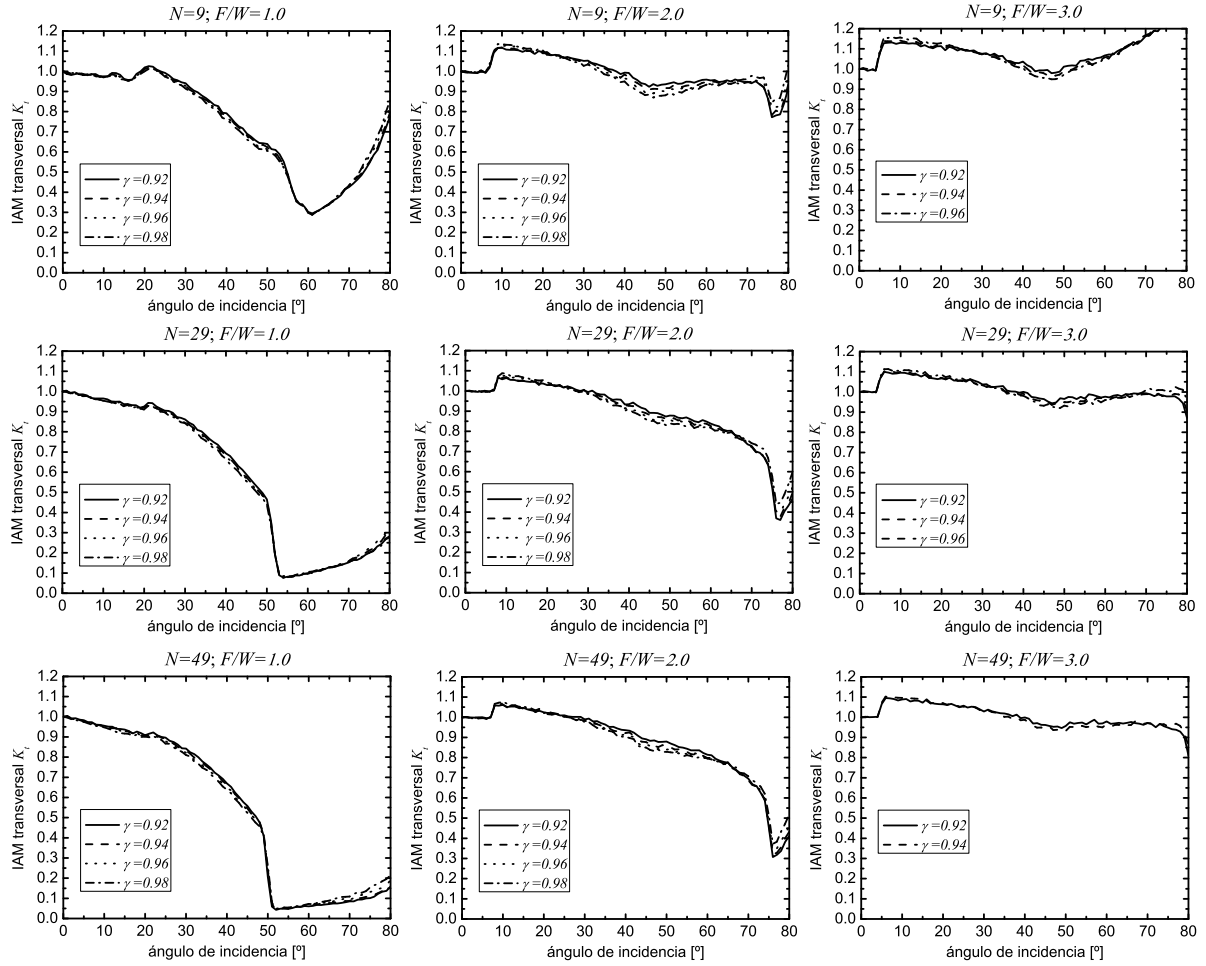


Figura 5.7: curvas del IAM transversal dependiendo del factor de intercepción γ para diferentes valores de N y F/W

A pesar de que este estudio se centra únicamente en los efectos ópticos, cabe notar que diseños que obtengan un buen factor de IAM transversal no implica necesariamente una buena eficiencia térmica si la mejora del IAM se obtiene a costa de disminuir el factor de concentración. El factor de concentración aumenta a medida que N aumenta, ver Figura 5.2. Por tanto, a pesar de que un valor bajo de N puede ser aconsejable para incrementar la eficiencia óptica, este efecto está relacionado con el aumento de pérdidas térmicas. El caso de F/W es justo lo contrario, a medida que F/W aumenta disminuye el factor de concentración geométrica, ver Tabla 5.2. Finalmente, y en cuanto al factor de intercepción γ , obviamente la concentración geométrica disminuye al aumentar γ , sin embargo la influencia en IAM transversal es negligible. Esta discusión se resume en la Tabla 5.3. Se observa pues una contraposición entre los efectos en el IAM y en la concentración.

Parámetro incrementado	Efecto IAM transversal	Efecto Concentración Geométrica
F/W	\uparrow	\downarrow
N	\downarrow	\uparrow
γ	\sim	\downarrow

Tabla 5.3: Efecto en el IAM transversal y en la concentración geométrica si se incrementan los parámetros F/W , N y γ

5.3.3. IAM longitudinal

Para calcular el modificador de ángulo IAM longitudinal se ha supuesto una longitud del concentrador de $L=10$ u con la finalidad de apreciar los efectos de borde. Se han emitido 400000 rayos para cada posición del Sol en el plano axial de 0° a 80° con pasos de 1° . En las Figuras 5.8, 5.9, y 5.10 se muestra la dependencia angular del IAM longitudinal para los mismos casos que en el IAM transversal.

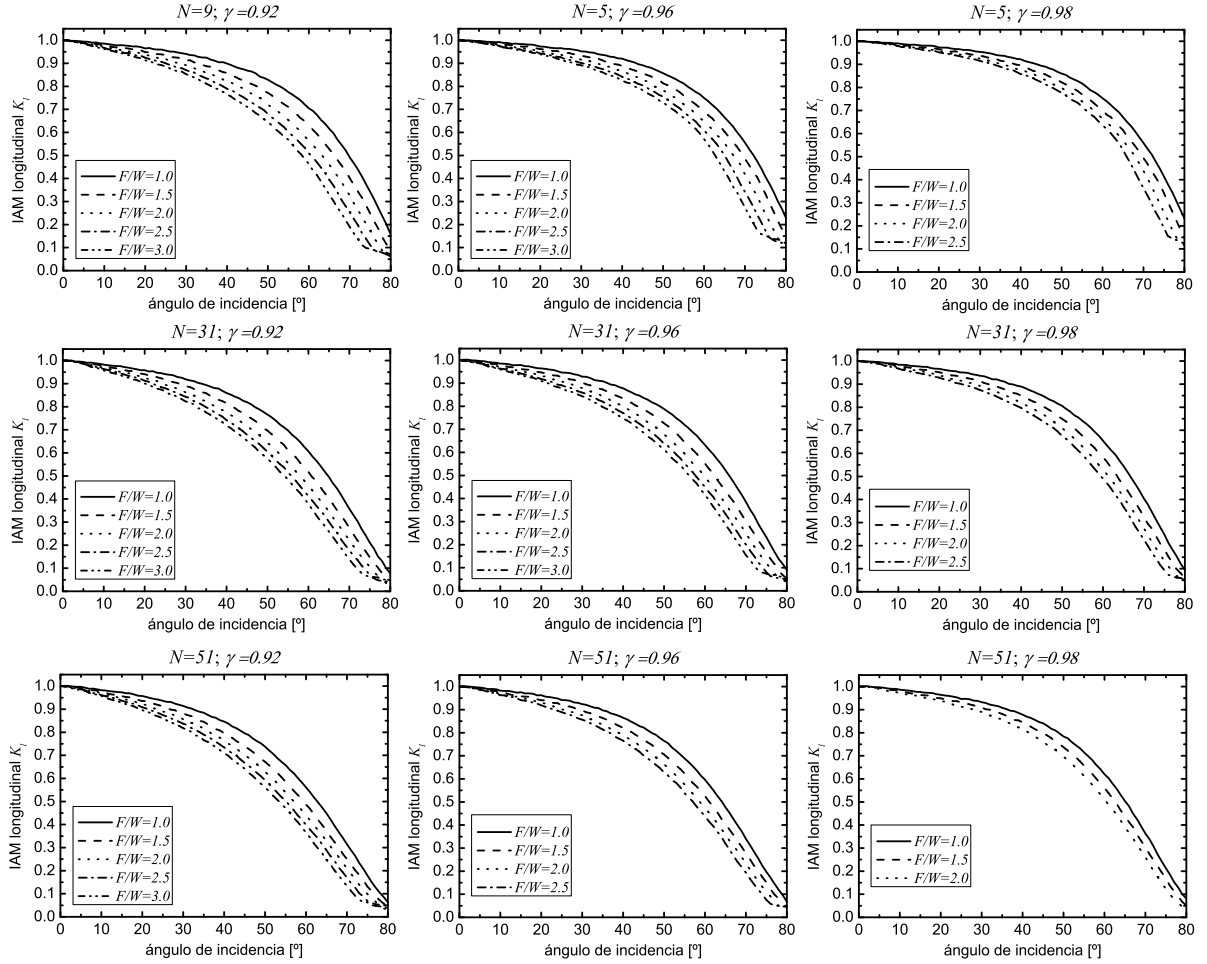
En la Figura 5.8 se puede observar que un incremento en el parámetro F/W produce una reducción en el IAM longitudinal. Esto se debe a que al incrementar el factor F/W la distancia entre el reflector y el receptor aumenta, y entonces los rayos no alcanzan al receptor debido a las pérdidas por los extremos.

En cuanto al parámetro N , se puede ver que a medida que aumenta el número de espejos también aumentan las pérdidas en el IAM longitudinal, ver Figura 5.9. Esto se debe a dos efectos, el primero que cuando N decrece el tamaño del receptor aumenta, aumentando también la energía capturada directa del Sol sin ser reflejada por los espejos (el receptor captura energía por ambas caras). En segundo lugar, el número de escalones también disminuye al disminuir N y por tanto es menos probable que un rayo sea interceptado por un escalón. Sin embargo, este efecto en el IAM longitudinal es algo inferior al efecto producido por F/W .

Finalmente, y en cuanto al parámetro γ , se observa que a medida que éste aumenta el IAM longitudinal aumenta también, ver Figura 5.10. De nuevo esto es debido a que el tamaño del receptor aumenta cuando γ aumenta, y por tanto mayor cantidad de energía es interceptada directamente por el receptor sin pasar por el reflector.

En la Tabla 5.4 se resumen los efectos que cada parámetro de diseño produce al IAM longitudinal.

Parámetro incrementado	Efecto IAM longitudinal
F/W	↓
N	↓
γ	↑

Tabla 5.4: Efecto en el IAM longitudinal si se incrementan los parámetros F/W , N y γ Figura 5.8: Curvas del IAM longitudinal dependiendo del valor de F/W para diferentes valores de N y γ

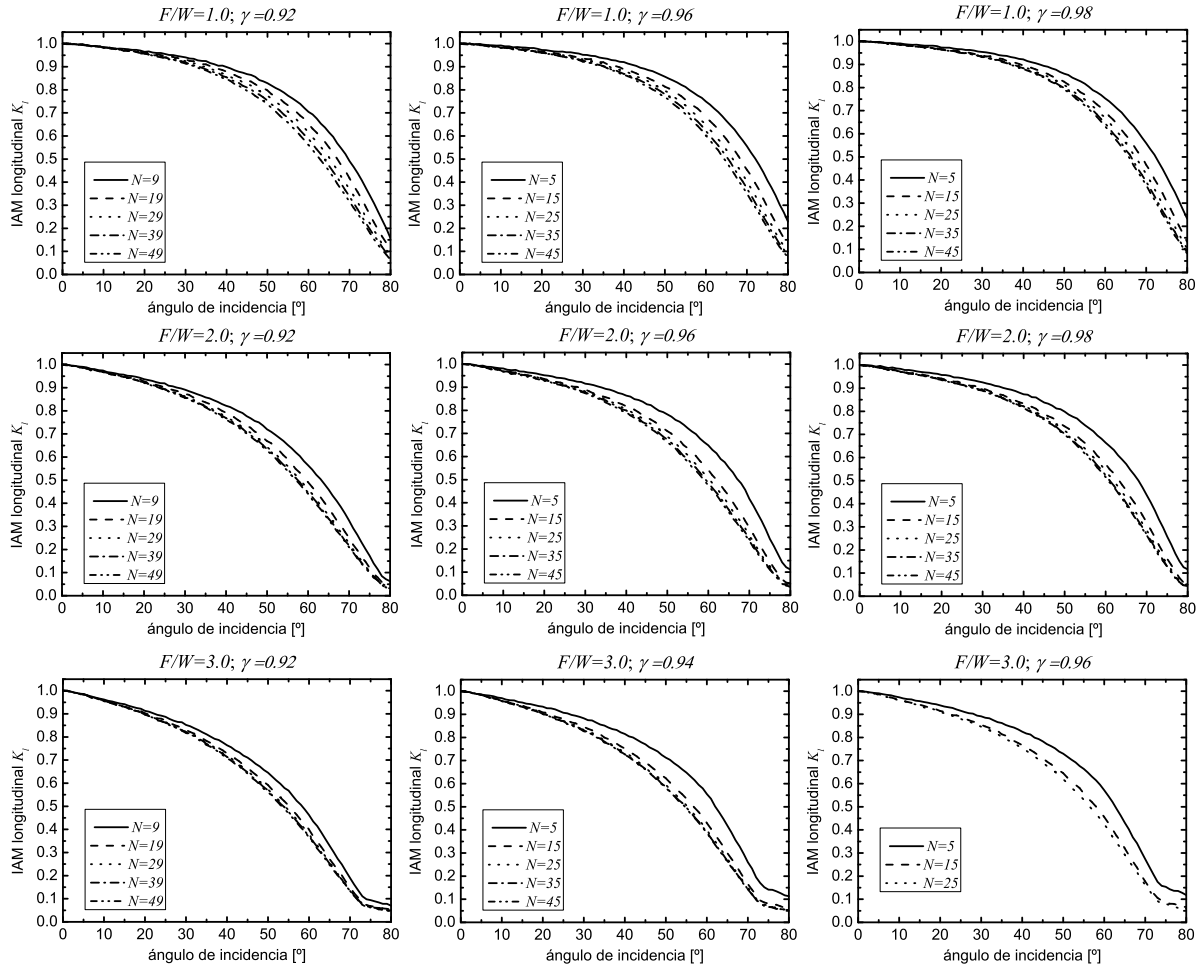


Figura 5.9: Curvas del IAM longitudinal dependiendo del número de espejos N para diferentes valores de F/W y γ

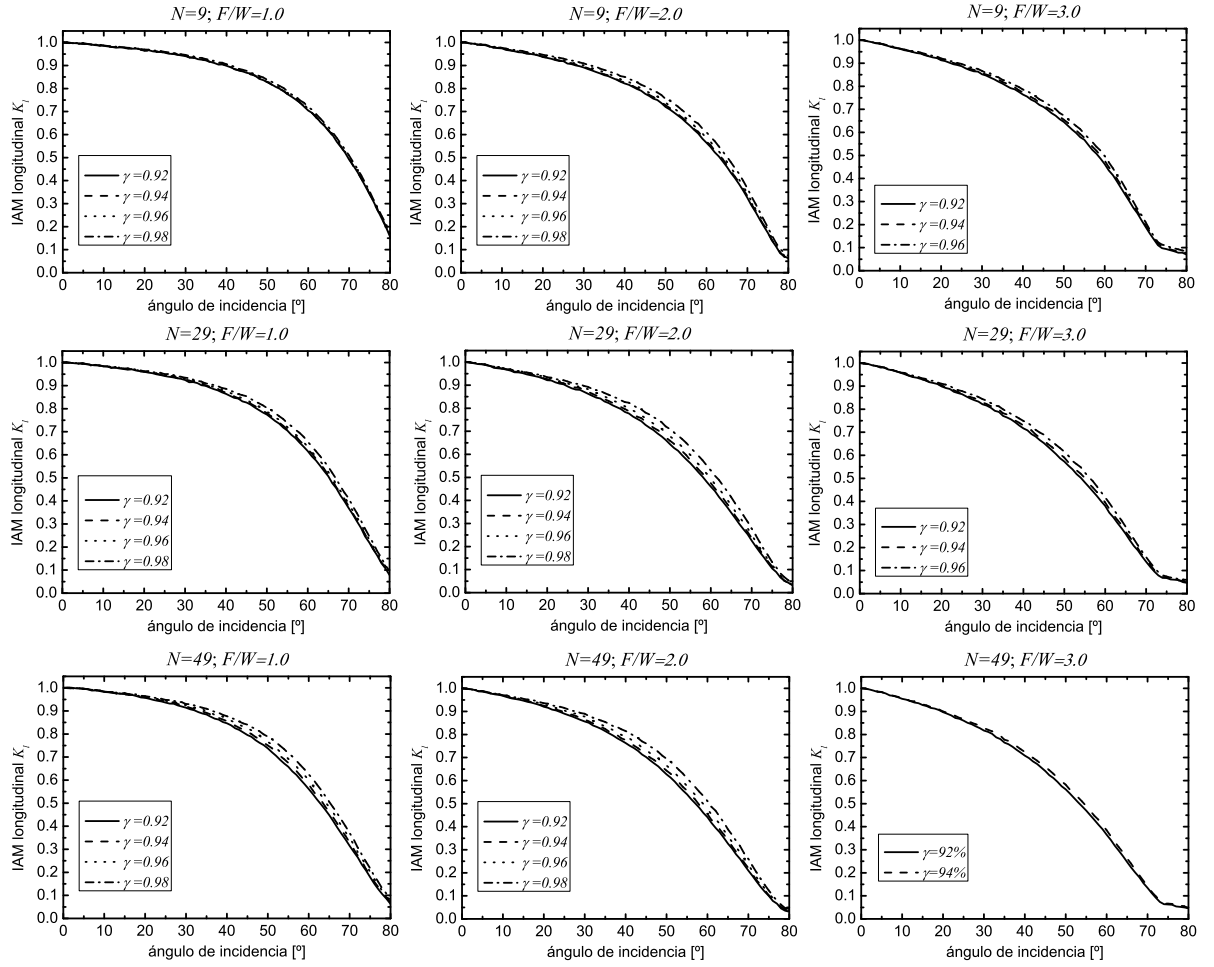


Figura 5.10: Curvas del IAM longitudinal dependiendo del factor de intercepción γ para diferentes valores de N y F/W

5.3.4. Aproximación factorizada del IAM

Se ha sugerido que el modificador de ángulo para sistemas de baja concentración puede factorizarse de acuerdo con la aproximación estándar para captadores planos $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)$ (McIntire, 1982). Sin embargo, el uso del modificador de ángulo factorizado puede causar errores en la estimación de la energía capturada para estos sistemas (Rönnelid et al., 1997). Con el fin de realizar un estudio óptico completo del FMSC, y para averiguar el grado de fiabilidad de la aproximación de factorización del IAM, se ha calculado el IAM con la aproximación factorizada y comparado con el valor real a partir del trazado de rayos 3D. Para esta comparación se han escogido 160 casos al azar de los 791 casos estudiados en las Secciones anteriores. El IAM calculado por el trazado de rayos se corresponde con los ángulos solares azimutal y cenital entre 0° y 90° en pasos de 5° . Luego, para cada par de los ángulos solares se aplica una transformación con el fin de obtener los ángulos transversal y longitudinal y así obtener el IAM en función de ambos ángulos $K(\theta_t, \theta_l)$. Las expresiones que relacionan ambos ángulos se encuentran en la Sección 4.4 del Capítulo 4.

Las simulaciones se han realizado con la emisión de 400000 rayos. El error entre la aproximación factorizada y el valor teórico viene dado por la Ecuación (5.4), el factor coseno $\cos(\theta_i)$ (donde θ_i es el ángulo de incidencia solar al reflector) se añade para referenciar el error respecto a la radiación directa normal al Sol(DNI).

$$\Delta K = [K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l) - K(\theta_t, \theta_l)] \cos(\theta_i) \quad (5.4)$$

Se han utilizado cuatro estimadores del error para evaluar la bondad de la aproximación de factorización: raíz cuadrada del error cuadrático medio $RMSE$, error medio sesgado MBE , error medio absoluto MAE , y error medio ME . Las Ecuaciones (5.5-5.8) muestran las expresiones para cada estimador del error.

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum \Delta K^2 \right]^{1/2} \quad (5.5)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum \Delta K \quad (5.6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum \frac{|\Delta K|}{K(\theta_t, \theta_l) \cos(\theta_i)} \quad (5.7)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum \frac{\Delta K}{K(\theta_t, \theta_l) \cos(\theta_i)} \quad (5.8)$$

El valor promedio de cada uno de estos estimadores se ha calculado para los ángulos solares cenital y azimutal de 0° a 70° . En la Tabla 5.5 se muestran los promedios de $RMSE$, MBE ,

MAE , y ME para los 160 casos escogidos al azar. En vista de los resultados, la aproximación factorizada presenta una subestimación de la energía captada como puede verse por los valores negativos en MBE y ME . Es razonable suponer que esta subestimación está ocasionada por una sobreestimación de las pérdidas de contorno causada por los efectos de borde. La factorización simple supone que el receptor se encuentra posicionado siempre en la posición más alta del círculo, lo que no es una hipótesis realista. Para evitar este efecto, el factor IAM longitudinal puede ser modificado de acuerdo con un simple análisis geométrico con el factor de corrección $f(\theta_t, \theta_l)$ descrito en la Ecuación (5.9), donde L es la longitud del concentrador en la dimensión longitudinal y $\theta_{t,LIM}$ es el ángulo de incidencia transversal en la que se produce la intersección entre el receptor y el reflector. El factor $f(\theta_t, \theta_l)$ vale uno cuando el ángulo longitudinal es superior a 75° con el fin de evitar la singularidad cuando se alcanzan ángulos grandes. La nueva factorización propuesta es $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$.

Con la nueva factorización propuesta, los valores de $RMSE$, MBE , MAE y ME han disminuido y no se observa una clara subestimación del IAM, ver Tabla 5.5.

$$f(\theta_t, \theta_l) = \begin{cases} \frac{\frac{L - [R + R\cos(2\theta_t)]\tan(\theta_l)}{L - 2R\tan(\theta_l)}}{\frac{L - [R + R\cos(2\theta_{t,LIM})]\tan(\theta_l)}{L - 2R\tan(\theta_l)}} & \theta_t < \theta_{t,LIM} \text{ y } \theta_l < 75^\circ \\ \frac{L - [R + R\cos(2\theta_{t,LIM})]\tan(\theta_l)}{L - 2R\tan(\theta_l)} & \theta_t \geq \theta_{t,LIM} \text{ y } \theta_l < 75^\circ \\ 1 & \theta_l \geq 75^\circ \end{cases} \quad (5.9)$$

Aproximación IAM	$RMSE$	MBE	MAE [%]	ME [%]
$K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)$	0.0344	-0.0164	6.19	-4.04
$K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$	0.0165	-0.0023	3.50	-0.10

Tabla 5.5: Valores medios de los estimadores de error para la factorización simple y para la nueva factorización del IAM para 160 casos escogidos al azar

En la Figura 5.11a) se muestra la superposición de la factorización propuesta teórica y el IAM real para el caso correspondiente a los máximos MAE y ME obtenido en los 160 casos escogidos para este análisis. Se puede observar que ambos casos son muy similares. En la Figura 5.11b) se representa el error para este mismo caso. Los picos del error se producen por la disminución abrupta en el IAM transversal cuando el ángulo transversal es de 50° , momento en el que se da el contacto del receptor con los espejos y ya no se puede seguir el Sol ($\theta_{t,LIM} = 50^\circ$), ver la Figura 5.5 donde aparece un caso con parámetros de diseño similares. Cuando se produce una disminución abrupta en el IAM transversal, una pequeña variación en la posición solar implica grandes errores en la aproximación factorizada, ya que representa una discontinuidad en una superficie suave. Otro caso está representado en las Figuras 5.12a) y 5.12b), con valores de $RMSE$, MBE , MAE , y ME similar a los valores medios de los 160 casos analizados. En este último caso se observa que la aproximación factorizada subestima la energía capturada para ángulos muy elevados tanto en la dirección transversal como en

la dirección longitudinal. Esto es debido a que la aproximación factorizada no reproduce el valor real para ángulos de θ_t y θ_l elevados. Sin embargo, estos errores no tienen un efecto significativo en la estimación de la energía capturada, ya que se producen en ángulos donde, por una parte la energía incidente en el captador es bastante reducida, y por otra el valor del IAM es extremadamente bajo.

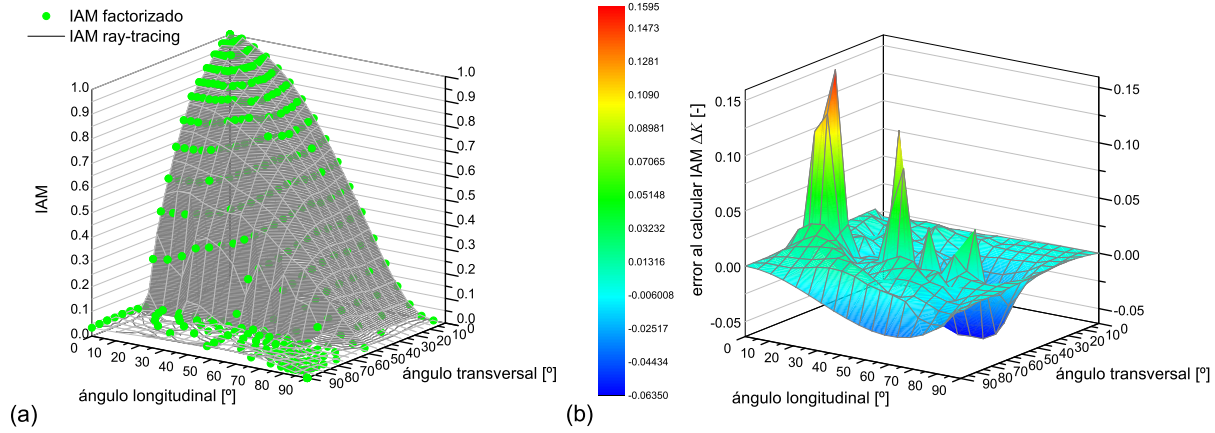


Figura 5.11: Caso analizado $N=45$, $F/W=1.0$ y $\gamma=0.92$. Los valores en los estimadores del error son $RMSE=0.0252$, $MBE=-0.0021$, $MAE=21.43\%$, y $ME=16.31\%$. (a): IAM calculado por factorización y valor real mediante *ray-tracing*. (b): error al calcular IAM a partir de la factorización $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$ en lugar de $K(\theta_t, \theta_l)$

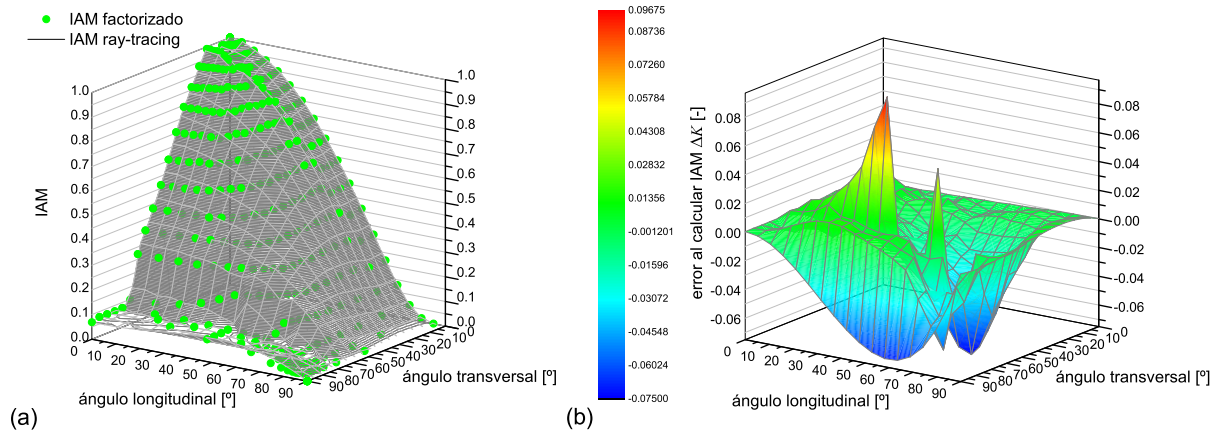


Figura 5.12: Caso analizado $N=25$, $F/W=1.25$ y $\gamma=0.98$. (a): IAM calculado por factorización y valor real mediante *ray-tracing*. (b): error al calcular IAM a partir de la factorización $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$ en lugar de $K(\theta_t, \theta_l)$. Los valores en los estimadores del error son $RMSE=0.0154$, $MBE=-0.0041$, $MAE=3.56\%$, y $ME=-0.55\%$

5.3.5. Distribución de densidad de radiación en el receptor

Es importante conocer la distribución de radiación en el receptor para tener constancia de los picos y de las zonas sin radiación, para tener conocimiento del nivel de radiación que va a tener que soportar el material selectivo.

La concentración de radiación en función de la posición local del receptor ha sido calculada para cuatro casos de diseño en tres ángulos de incidencia transversal distintos: $\theta_t = 0^\circ$, 30° y 60° . El receptor ha sido discretizado en cien segmentos transversales y se han emitido 10^6 rayos en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 5.13. Las unidades se dan en soles, que corresponde a la densidad de radiación de un Sol en dirección normal al Sol. Se observa que, independientemente del ángulo de incidencia transversal, la distribución de radiación en el receptor es simétrica con forma de campana. Las distribuciones de radiación presentan una notable simetría a pesar de que la geometría del sistema no es simétrica para ángulos diferentes a incidencia normal. Por otro lado, se aprecia que para un número bajo de espejos ($N=11$) la distribución es más bien de tipo escalón sin pendientes abruptas en el inicio y en el final del escalón. La concentración máxima que se alcanza en el pico de la campana depende únicamente del número de espejos y del factor F/W . Cuanto mayor es el número de espejos más densidad de concentración se alcanza, y cuanto mayor ratio F/W menos densidad de concentración se alcanza debido a la dispersión de los rayos reflejados. Por ello puede explicarse que se obtenga una concentración pico de 19.9 soles para $F/W = 1.25$ con 31 espejos y una concentración pico inferior a la anterior de 17.6 soles para el caso de $F/W = 1.75$ a pesar de disponer de más espejos, $N=35$. En la figura se ha expuesto la eficiencia óptica para cada ángulo, se observa una disminución en la eficiencia óptica a medida que aumenta el ángulo de incidencia transversal, tal y como se ha visto anteriormente. De nuevo en estos resultados no se incluye el factor F_{av} .

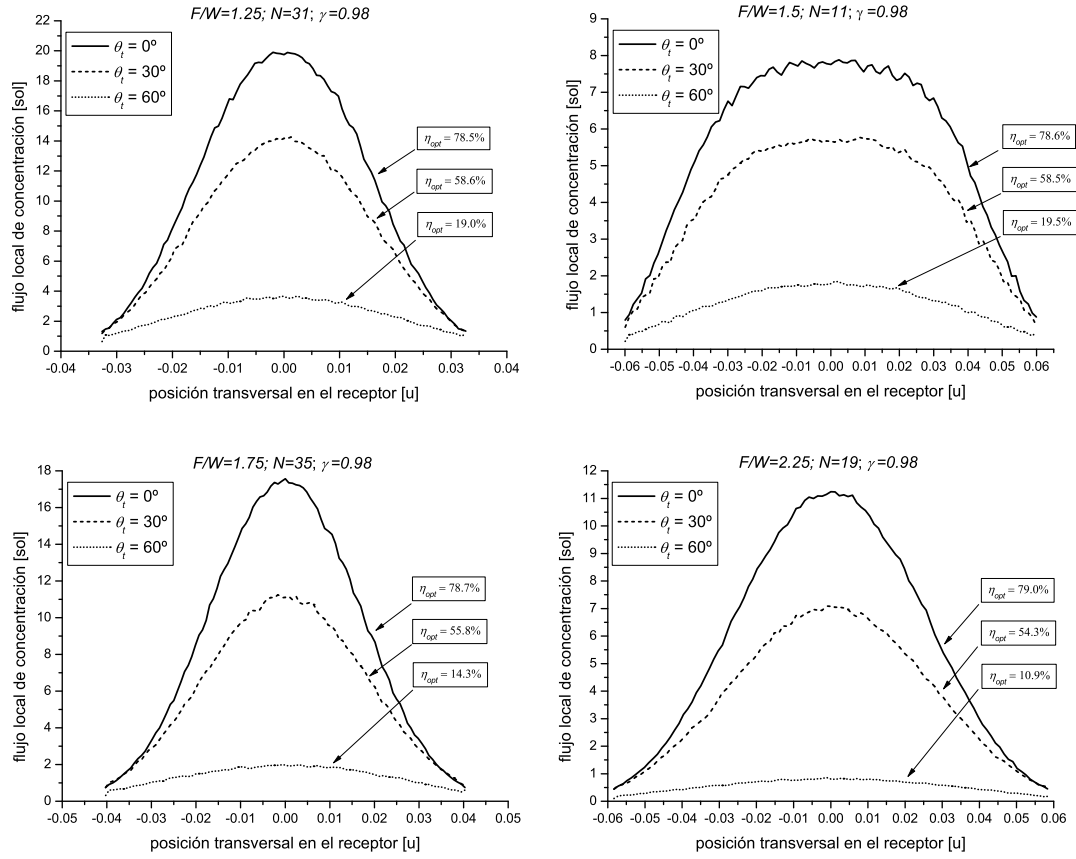


Figura 5.13: Distribución local de la densidad de radiación en el receptor

5.4. Eficiencia térmica del FMSC. Resultados y discusión

Se ha visto que algunos diseños del FMSC obtienen valores del IAM próximos a la unidad para concentraciones geométricas medias $C_g \gtrsim 7$, que en principio permitirían alcanzar temperaturas del orden de 200°C . Los estudios anteriores han servido para conocer el comportamiento óptico del FMSC, pero para conocer todas las pérdidas energéticas es necesario realizar un análisis incluyendo las pérdidas térmicas del receptor.

En esta Sección se calcula la eficiencia térmica anual para una temperatura de trabajo $T_{av}=200^\circ\text{C}$ considerando tres climas diferentes, correspondientes a las siguientes localidades: Palma de Mallorca (Lat= 39.5°N), Múnich (Lat= 48.1°N) y El Cairo (Lat= 30.1°N). Los datos climatológicos de las localidades han sido presentadas en el Capítulo 4. Para cada una

de las localidades se ha analizado las orientaciones NS y EO con una inclinación de 15° en ambos casos.

Se ha comparado el comportamiento térmico del FMSC con el captador de tubos de vacío escogido como referencia en el Capítulo 4 (tubos de vacío considerados para determinar los coeficientes de pérdida para el receptor del FMSC). La orientación del captador de referencia es la misma que la considerada en el FMSC.

La potencia instantánea por unidad de superficie neta \dot{Q}_g del FMSC viene dada por la Ecuación (4.26). Así pues, la energía anual capturada por el FMSC $Q_{g,a}$ y la eficiencia anual $\eta_{b,a}$ se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$Q_{g,a} = \sum_{d=1}^{d=365} \left[\int_{h=1}^{h=24} \dot{Q}_g dh \right] \quad (5.10)$$

$$\eta_{b,a} = \frac{Q_{g,a}}{A_a E_b} \quad (5.11)$$

donde E_b es la integral anual de la radiación directa incidente sobre la apertura del captador. La integración se ha realizado con intervalos de 0.1 hora y sólo se han considerado los valores positivos de \dot{Q}_g para realizar la integral.

La eficiencia anual para los diferentes climas analizados se presenta en las Figuras 5.14, 5.16 y 5.18 para orientación NS, y en las Figuras 5.15, 5.17 y 5.19 para orientación EO. Estas gráficas muestran los resultados para $F/W=1.00, 1.25, 1.50, 2.00, 2.50$ y 3.00 . Los resultados para $F/W=1.75, 2.25$ y 2.75 no se exponen para mayor simplicidad del gráfico y no aportar información de tendencia. Aún así estos casos también han sido calculados y algunos resultados se exponen en tablas posteriores. El caso de $F/W=2.75$ se expone en las gráficas para $\gamma=0.98$, ya que no es posible alcanzar este factor de intercepción para $F/W=3.0$.

En todos los casos se observa que a medida que el número de espejos aumenta también aumenta la eficiencia térmica anual hasta alcanzar un cierto valor de N a partir del cual el incremento es casi nulo e incluso de tendencia ligeramente negativa. Cuando esto último ocurre indica que existe un número óptimo del número de espejos N para cada valor de γ y de F/W donde la eficiencia térmica es máxima. Este valor depende de la orientación y ubicación del concentrador. En los tres climas analizados se observa que valores de $F/W=2.00$ son óptimos para orientación NS, y valores inferiores como $F/W=1.25-1.5$ son óptimos para orientación EO. Se observa un gran incremento de la energía capturada al pasar del valor $F/W=1.00$ al valor $F/W=1.25$ en el caso de orientación NS. Un aspecto común es que a medida que aumenta el factor de intercepción γ aumenta también la energía capturada del FMSC. Así pues se ha determinado que el parámetro de diseño γ óptimo para todos los valores de N y F/W es $\gamma=0.98$. Se observa que el FMSC en orientación NS alcanza eficiencias ligeramente superiores, del orden del 1 %, respecto a la orientación EO.

En el caso de Palma de Mallorca el valor máximo que se obtiene para la eficiencia térmica anual en orientación NS es $\eta_{b,a}=44.4\%$, que se obtiene para valores de $N=37$, $F/W=2.00$ y $\gamma=0.98$. En la orientación EO el máximo se obtiene en $\eta_{b,a}=43.4\%$, que se corresponde con valores $N=37$, $F/W=1.50$ y $\gamma=0.98$. Con la finalidad de encontrar un par de valores para N y F/W óptimos para el clima de Palma de Mallorca, en la Tabla 5.6 se exponen las eficiencias térmicas en las dos orientaciones y también su promedio, $\bar{\eta}_{b,a}$. Puede tomarse como diseño óptimo aquel diseño que alcanza un valor máximo promedio entre ambas orientaciones, dado que un concentrador solar basado en la geometría del FMSC tanto podrá instalarse en orientación NS como en orientación EO (dependiendo de las características de la superficie disponible para el campo de captadores). Los datos expuestos en la Tabla 5.6 están ordenados de mayor a menor eficiencia promedio para todos los valores de $\gamma=0.98$. Se han expuesto los 90 diseños más eficientes en promedio de un total de 163 casos para $\gamma=0.98$. Los 40 diseños más eficientes están caracterizados por valores en el rango $F/W=1.5-2.0$ y valores en el rango de $N=23-51$; correspondiendo a un rango de concentraciones geométricas $C_g=5.4-7.8$. Merece especial atención el caso de $F/W=1.5$ y $N=19$ con una eficiencia promedio del 43.2% , dado que toma valores bajos de estos parámetros, lo que simplificaría el diseño constructivo del mismo, y se sitúa cerca de la eficiencia máxima promedio del 43.8% , cuyo diseño implica un número mayor de espejos, $N=45$, y del ratio $F/W=1.75$.

Para el clima de El Cairo, el valor máximo que se obtiene en la eficiencia térmica anual en orientación NS es del $\eta_{b,a}=48.5\%$, diseño que corresponde a los valores $N=29$, $F/W=2.50$ y $\gamma=0.98$. En la orientación EO se obtiene un valor máximo de $\eta_{b,a}=47.4\%$, cuyos parámetros de diseño toman los valores de $N=37$, $F/W=1.50$ y $\gamma=0.98$ (se observa que este diseño coincide con el caso del clima de Palma de Mallorca). Al igual que el análisis hecho para el clima de Palma de Mallorca, en la Tabla 5.7 se exponen las eficiencias térmicas para las dos orientaciones y también su promedio de manera ordenada en $\bar{\eta}_{b,a}$ para los primeros 90 casos más eficientes con $\gamma=0.98$. Los 40 diseños más eficientes están caracterizados por valores en el rango $F/W=1.75-2.5$ y valores en el rango de $N=19-51$; correspondiendo a un rango de concentraciones geométricas $C_g=4.4-6.6$. De nuevo, merece especial atención el caso de $F/W=1.5$ y $N=19$ con una eficiencia promedio del 47.2% que se sitúa cerca de la eficiencia máxima promedio del 47.9% , cuyo diseño implica un número mayor de espejos, $N=41$, y mayor ratio $F/W=2.00$.

En cuanto el comportamiento térmico del FMSC para el clima de Múnich, el valor máximo obtenido para la eficiencia térmica anual en orientación NS es del $\eta_{b,a}=39.4\%$, diseño que corresponde a los valores $N=45$, $F/W=1.75$ y $\gamma=0.98$. En orientación EO se obtiene un valor máximo de $\eta_{b,a}=39.3\%$, cuyos parámetros de diseño toman los valores de $N=37$, $F/W=1.50$ y $\gamma=0.98$ (se observa que este diseño coincide con los casos del clima de Palma de Mallorca y del clima de El Cairo). Al igual que en los dos casos anteriores analizados, en la Tabla 5.8 se exponen las eficiencias térmicas para las dos orientaciones y también su promedio de manera ordenada en $\bar{\eta}_{b,a}$ para los primeros 90 casos más eficientes con $\gamma=0.98$. Los 40 diseños más eficientes están caracterizados por valores en el rango $F/W=1.5-2.0$ y valores en el rango

de $N=23-51$; correspondiendo a un rango de concentraciones geométricas $C_g=5.4-7.8$. De nuevo, merece especial atención el caso de $F/W=1.5$ y $N=19$ con una eficiencia promedio del 38.6 % que se sitúa cerca de la eficiencia máxima promedio del 39.4 %, cuyo diseño implica un número mayor de espejos, $N=45$, y mayor ratio $F/W=1.75$.

Se observa, según los climas analizados con latitudes de 30.1°N , 39.5° y 48.1° , una disminución del orden del 4.5 % absoluto en la eficiencia térmica promedio al pasar de una localidad a otra localidad con una latitud $\sim 10^\circ$ superior.

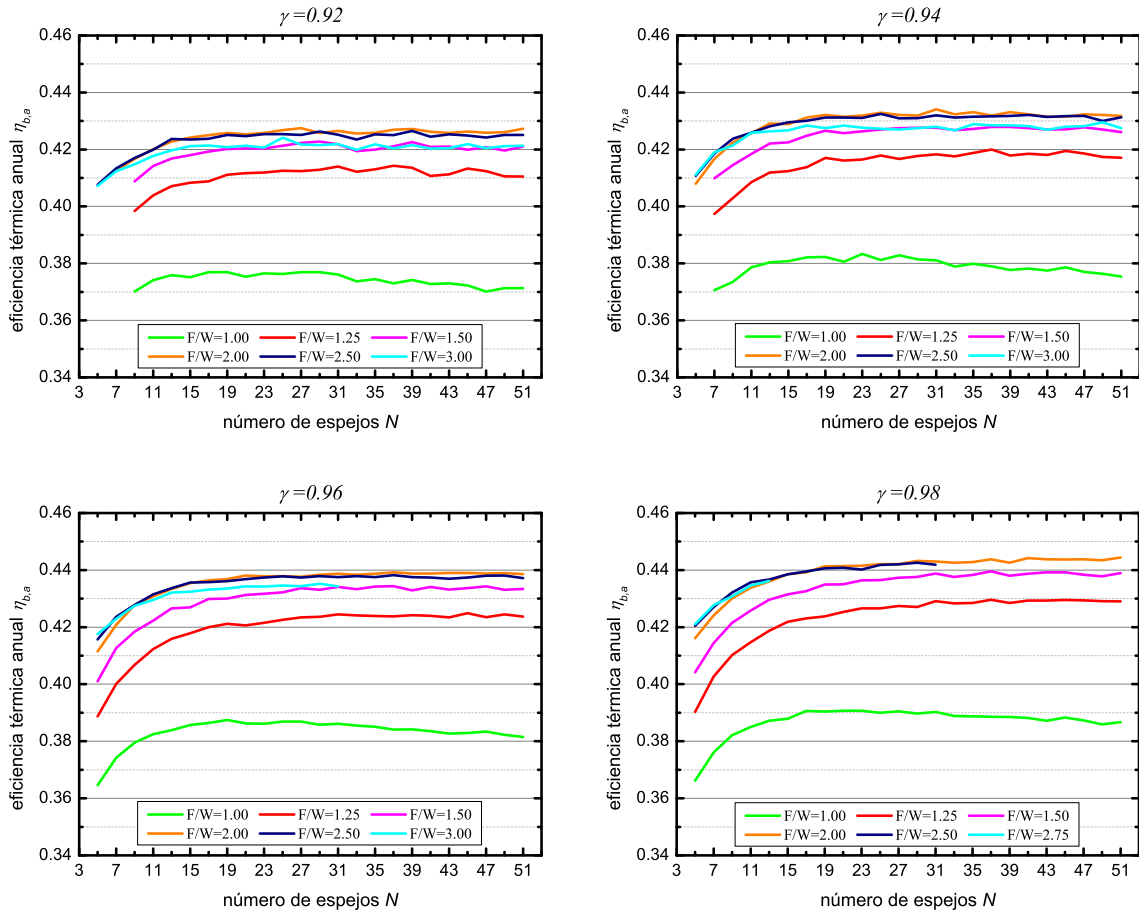


Figura 5.14: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Palma de Mallorca.

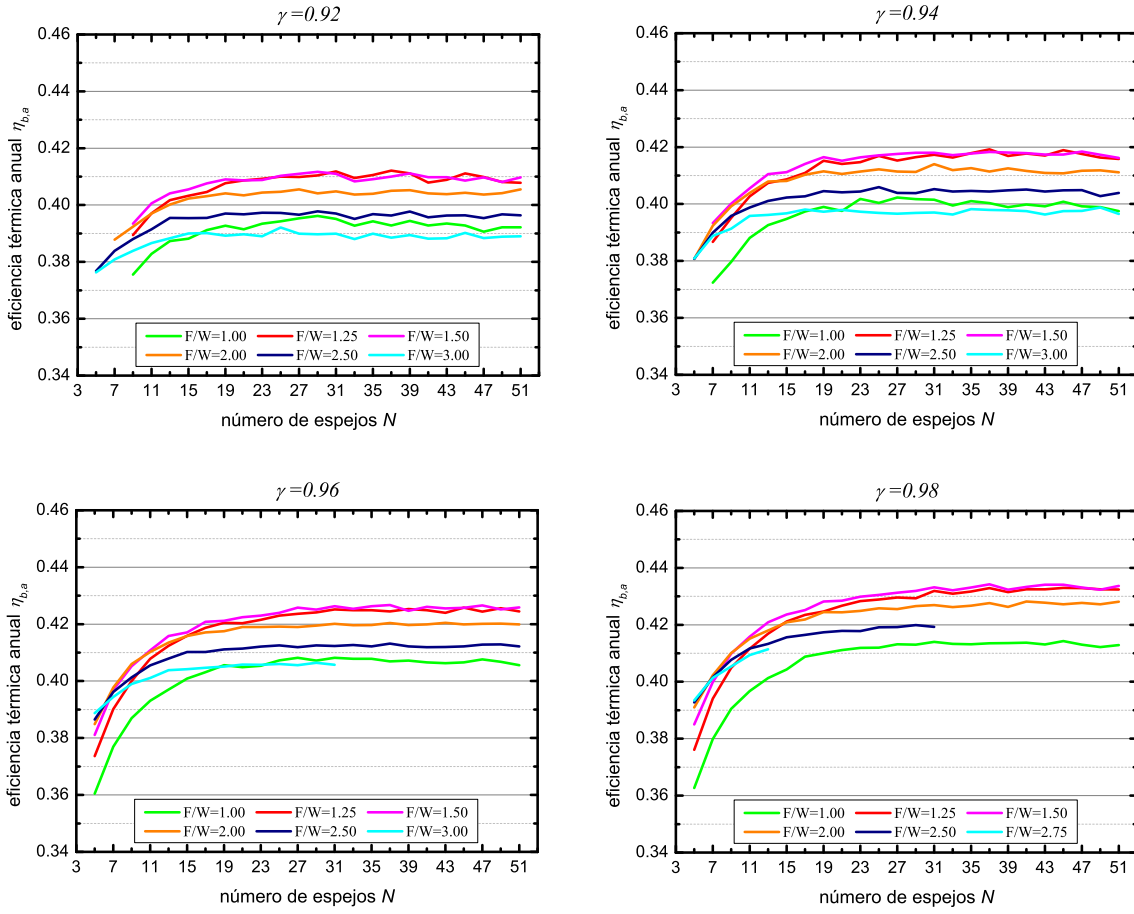


Figura 5.15: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\alpha_c=15^\circ$. Clima de Palma de Mallorca.

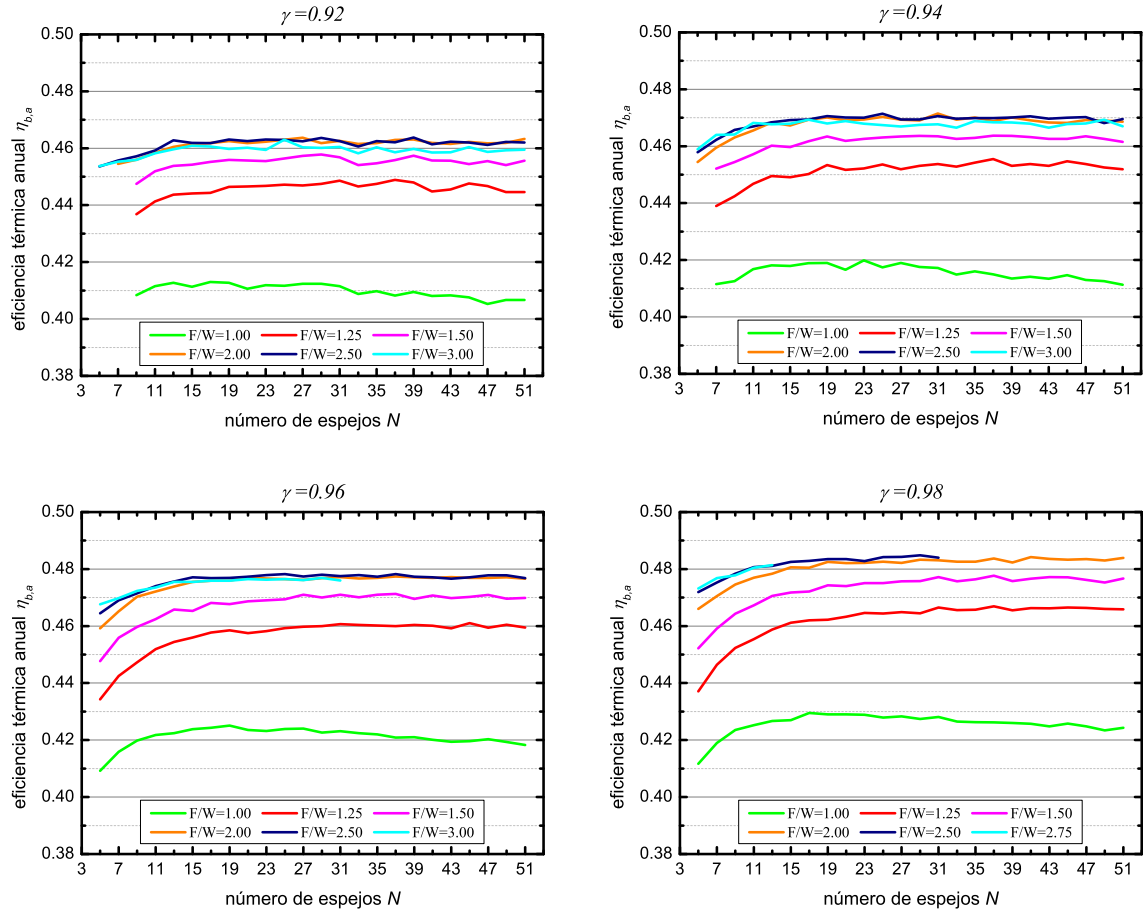


Figura 5.16: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de El Cairo.

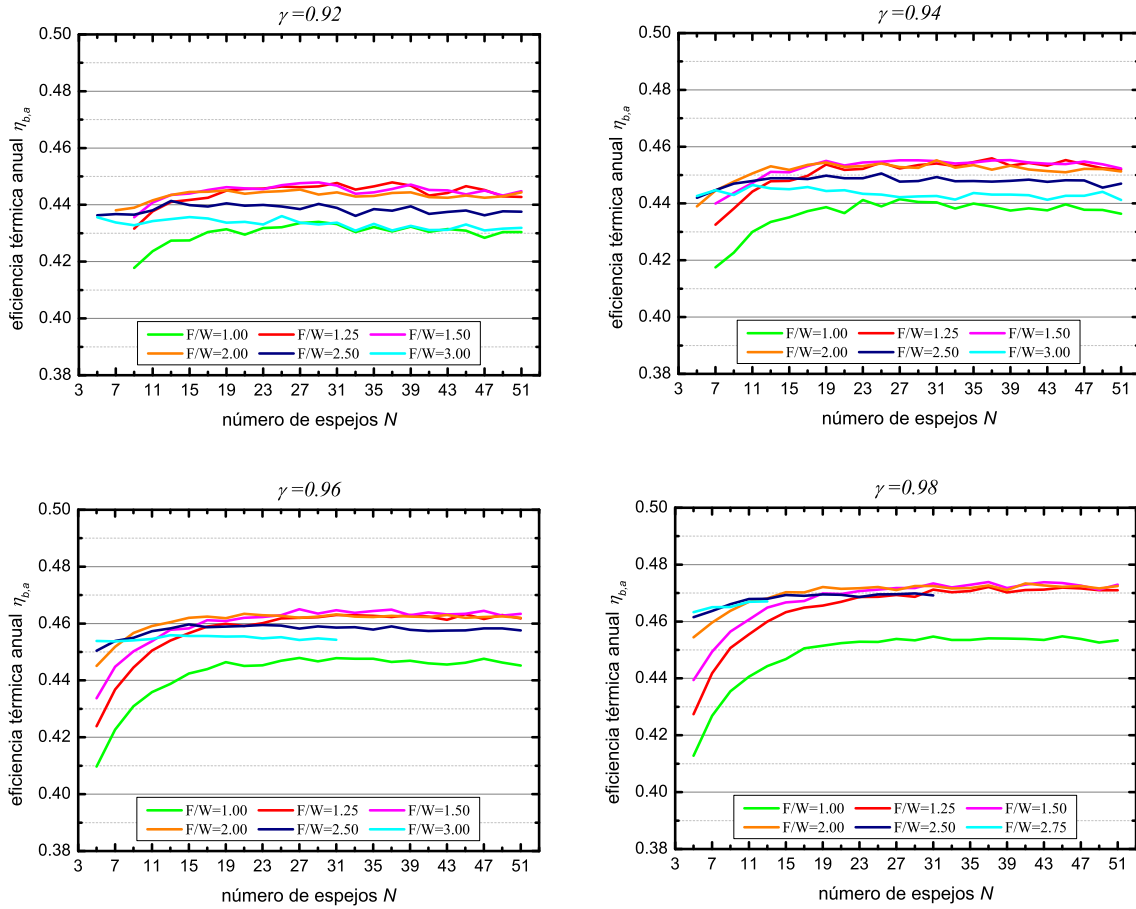


Figura 5.17: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\alpha_c=15^\circ$. Clima de El Cairo.

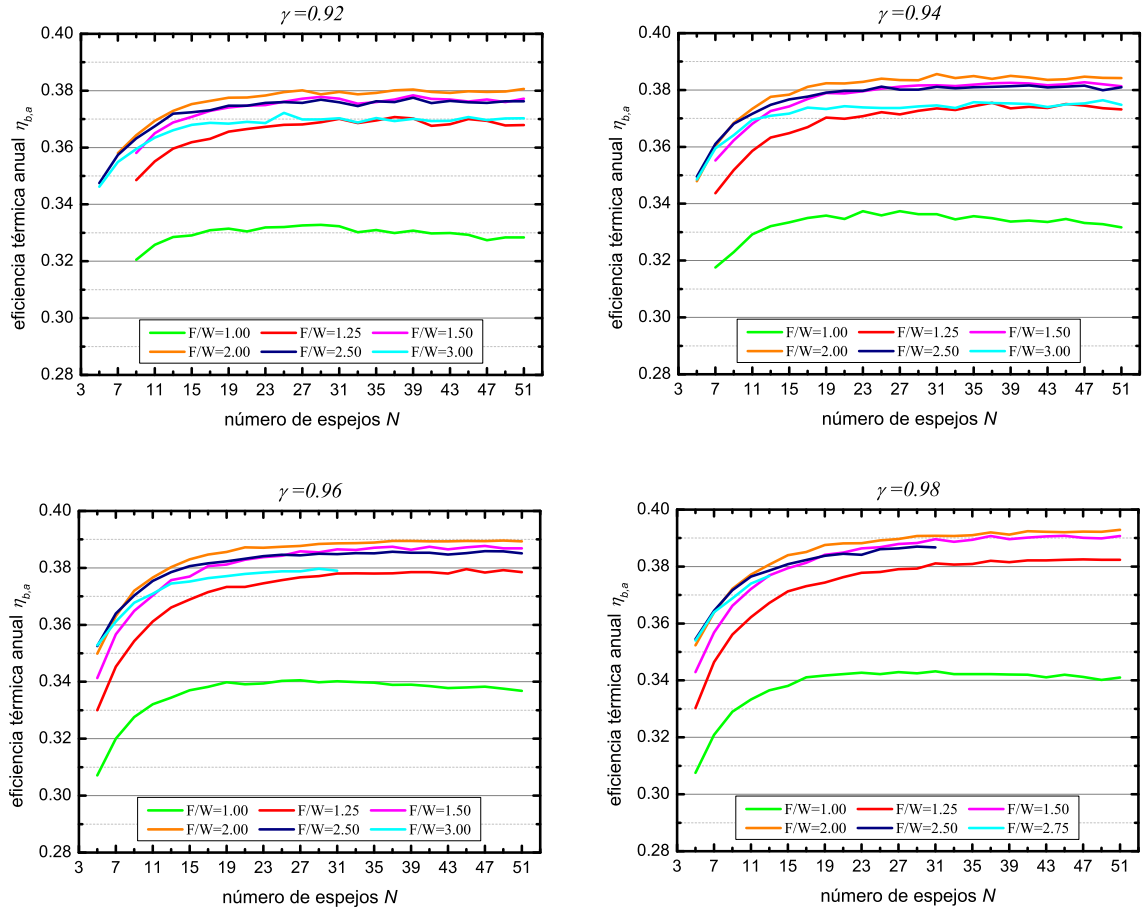


Figura 5.18: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Múnich.

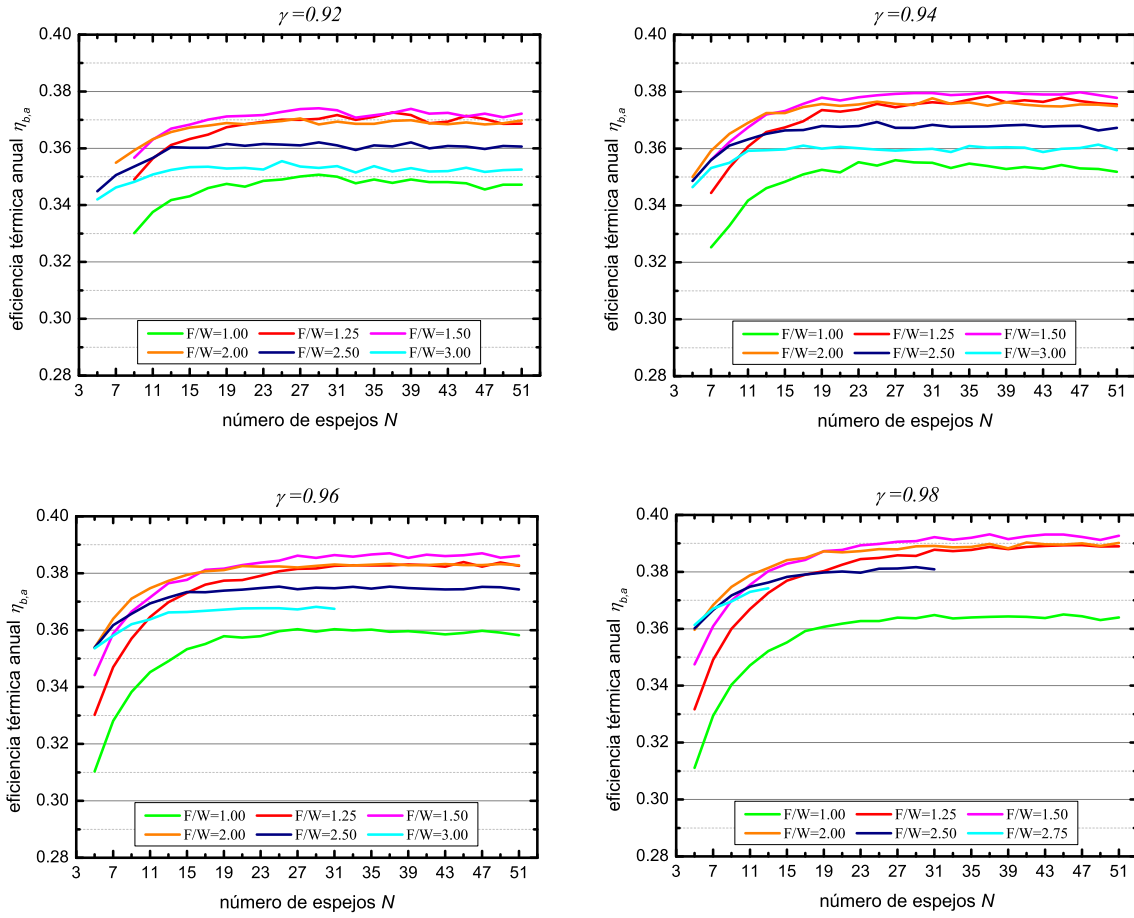


Figura 5.19: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función del número de espejos N para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del FMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\alpha_c=15^\circ$. Clima de Múnich.

F/W	C_g	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_g	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_g	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$
1.75	6.56	45	44.4	43.2	43.8	1.75	5.95	27	44.1	42.9	43.5	2	4.92	21	44.1	42.4	43.3
1.75	6.62	51	44.3	43.2	43.8	2	5.42	31	44.3	42.7	43.5	2.25	4.8	27	44.3	42.3	43.3
1.75	6.46	41	44.3	43.1	43.7	2	5.35	29	44.3	42.7	43.5	2.25	4.71	25	44.2	42.2	43.2
1.75	6.47	43	44.3	43.1	43.7	1.5	6.92	33	43.8	43.2	43.5	1.5	5.98	21	43.5	42.9	43.2
1.75	6.55	47	44.3	43.1	43.7	1.5	6.71	29	43.8	43.2	43.5	2.25	4.53	23	44.2	42.2	43.2
1.5	7.14	37	44.0	43.4	43.7	2	5.58	35	44.3	42.7	43.5	1.5	5.64	19	43.5	42.8	43.2
1.75	6.21	35	44.3	43.1	43.7	2	5.77	39	44.3	42.6	43.4	1.25	8.06	37	43.0	43.3	43.1
1.75	6.33	37	44.3	43.1	43.7	2	5.54	33	44.3	42.6	43.4	1.25	8.59	45	43.0	43.3	43.1
1.5	7.33	43	43.9	43.4	43.7	1.5	6.58	27	43.7	43.1	43.4	2.5	4.37	29	44.3	42.0	43.1
1.5	7.44	45	43.9	43.4	43.7	1.75	5.59	23	44.1	42.8	43.4	1.25	8.73	47	42.9	43.3	43.1
1.75	6.15	33	44.3	43.1	43.7	2.25	5.14	43	44.4	42.4	43.4	2.25	4.48	21	44.1	42.1	43.1
1.75	6.08	31	44.2	43.0	43.6	2	5.1	25	44.2	42.6	43.4	1.25	8.56	41	42.9	43.3	43.1
1.5	7.62	51	43.9	43.4	43.6	2	5.32	27	44.2	42.6	43.4	1.25	8.59	43	42.9	43.3	43.1
2	5.91	51	44.4	42.8	43.6	2.25	5.07	39	44.4	42.4	43.4	1.25	8.87	49	42.9	43.3	43.1
1.75	5.99	29	44.2	43.0	43.6	2.25	5.2	47	44.4	42.4	43.4	1.25	8.99	51	42.9	43.2	43.1
2	5.66	41	44.4	42.8	43.6	2.25	5.17	51	44.4	42.4	43.4	2.25	4.29	19	44.1	42.1	43.1
1.75	6.53	39	44.2	43.0	43.6	2.25	5.08	41	44.4	42.4	43.4	2.5	4.31	27	44.2	41.9	43.1
1.5	6.83	31	43.9	43.3	43.6	1.5	6.33	25	43.7	43.1	43.4	2.5	4.46	31	44.2	41.9	43.1
1.5	7.31	41	43.9	43.3	43.6	2.25	5.05	37	44.3	42.4	43.4	2	4.51	17	43.9	42.2	43.1
1.75	6.72	49	44.2	43.0	43.6	2.25	5.14	45	44.3	42.4	43.3	1.25	7.66	31	42.9	43.2	43.1
2	5.73	43	44.4	42.8	43.6	2.25	5.02	35	44.3	42.3	43.3	2.5	4.28	25	44.2	41.9	43.0
1.5	7.54	47	43.8	43.3	43.6	2.25	5.18	49	44.3	42.4	43.3	1.75	4.96	17	43.7	42.4	43.0
2	5.79	47	44.4	42.8	43.6	2	4.97	23	44.2	42.5	43.3	1.25	7.99	35	42.9	43.2	43.0
1.5	6.99	35	43.8	43.3	43.6	1.5	6.21	23	43.6	43.0	43.3	1.25	8.53	39	42.9	43.2	43.0
2	5.62	37	44.4	42.8	43.6	1.75	5.34	21	43.9	42.7	43.3	2	4.29	15	43.9	42.1	43.0
2	5.8	45	44.4	42.7	43.5	1.75	5.23	19	44.0	42.7	43.3	1.25	7.9	33	42.8	43.1	43.0
1.75	5.68	25	44.1	42.9	43.5	2.25	4.83	29	44.3	42.3	43.3	2.5	4.08	21	44.1	41.8	42.9
2	5.92	49	44.3	42.7	43.5	2.25	4.89	31	44.3	42.3	43.3	2.5	3.98	19	44.1	41.7	42.9
1.5	7.39	39	43.8	43.2	43.5	2.25	4.99	33	44.3	42.3	43.3	2.5	4.15	23	44.0	41.8	42.9
1.5	7.76	49	43.8	43.2	43.5	2	4.69	19	44.1	42.5	43.3	1.75	4.6	15	43.6	42.2	42.9

Tabla 5.6: Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen *los* 90 casos más eficientes de un total de 163 calculados para $\gamma = 0.98$. Clima de Palma de Mallorca. La eficiencia se expresa en %.

F/W	C_g	N	$\eta_{b,a}$	NS	$\eta_{b,a}$	EO	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_g	N	$\eta_{b,a}$	NS	$\eta_{b,a}$	EO	$\bar{\eta}_{b,a}$
2	5.66	41	48.4	47.3	47.9	47.9	47.9	2	5.58	35	48.3	47.2	47.7	47.7	47.7
2	5.62	37	48.4	47.3	47.8	47.8	47.8	1.75	5.99	29	48.1	47.3	47.7	47.0	47.5
2	5.91	51	48.4	47.3	47.8	47.8	47.8	1.75	6.55	47	48.1	47.3	47.7	47.0	47.5
2	5.73	43	48.4	47.3	47.8	47.8	47.8	1.75	6.08	31	48.1	47.3	47.7	47.3	47.5
2	5.79	47	48.4	47.3	47.8	47.8	47.8	2	5.54	33	48.3	47.2	47.7	47.4	47.5
2.25	5.14	43	48.5	47.1	47.8	47.8	47.8	2.25	4.8	27	48.4	47.0	47.7	47.1	47.5
1.75	6.56	45	48.2	47.4	47.8	47.8	47.8	2.25	4.53	23	48.3	47.1	47.7	46.9	47.5
2	5.35	29	48.3	47.3	47.8	47.8	47.8	2.25	5.18	49	48.4	47.0	47.7	47.1	47.5
2.25	5.07	39	48.5	47.1	47.8	47.8	47.8	2	4.97	23	48.2	47.2	47.7	47.3	47.5
2.25	5.08	41	48.4	47.1	47.8	47.8	47.8	2.25	4.71	25	48.4	47.0	47.7	47.3	47.5
1.75	6.62	51	48.2	47.4	47.8	47.8	47.8	2.5	4.31	27	48.4	47.0	47.7	47.3	47.5
2	5.42	31	48.3	47.3	47.8	47.8	47.8	2.5	4.28	25	48.4	47.0	47.7	46.9	47.5
2	5.8	45	48.3	47.2	47.8	47.8	47.8	2	4.92	21	48.2	47.2	47.7	46.8	47.5
1.75	6.46	41	48.2	47.3	47.8	47.8	47.8	2	5.77	39	48.2	47.1	47.7	47.3	47.4
2.25	4.83	29	48.4	47.1	47.8	47.8	47.8	2.25	4.29	19	48.3	47.1	47.7	46.8	47.4
2.25	5.2	47	48.4	47.1	47.8	47.8	47.8	2	5.32	27	48.2	47.1	47.7	46.7	47.4
2.25	5.02	35	48.4	47.1	47.8	47.8	47.8	1.75	5.68	25	48.1	47.2	47.7	47.2	47.4
2.25	5.05	37	48.4	47.1	47.8	47.8	47.8	2.5	4.46	31	48.4	46.9	47.7	47.2	47.4
2.25	5.17	51	48.4	47.1	47.8	47.8	47.8	2.25	4.48	21	48.3	47.0	47.7	47.2	47.4
1.75	6.21	35	48.2	47.3	47.8	47.8	47.8	2.5	3.98	19	48.4	47.0	47.7	47.2	47.4
2.25	4.89	31	48.4	47.1	47.7	47.7	47.7	2.5	4.08	21	48.4	46.9	47.6	46.7	47.4
1.75	6.15	33	48.2	47.3	47.7	47.7	47.7	1.75	6.53	39	48.1	47.2	47.6	46.8	47.3
2	5.1	25	48.3	47.2	47.7	47.7	47.7	1.75	5.95	27	48.0	47.2	47.6	47.1	47.3
2.5	4.37	29	48.5	47.0	47.7	47.7	47.7	2.5	3.82	17	48.3	46.9	47.6	46.8	47.3
2	4.69	19	48.3	47.2	47.7	47.7	47.7	1.75	6.72	49	48.0	47.2	47.6	47.1	47.3
2	5.92	49	48.3	47.2	47.7	47.7	47.7	2.25	3.98	15	48.2	47.0	47.6	47.1	47.3
2.25	5.14	45	48.4	47.1	47.7	47.7	47.7	2.5	3.63	15	48.3	46.9	47.6	46.8	47.3
1.75	6.47	43	48.1	47.3	47.7	47.7	47.7	1.5	7.14	37	47.8	47.4	47.6	46.8	47.2
2.25	4.99	33	48.4	47.1	47.7	47.7	47.7	1.75	5.59	23	48.0	47.1	47.6	46.6	47.2
1.75	6.33	37	48.2	47.3	47.7	47.7	47.7	2.5	4.15	23	48.3	46.9	47.6	47.0	47.2

Tabla 5.7: Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 163 calculados para $\gamma = 0.98$. Clima de El Cairo. La eficiencia se expresa en %.

F/W	C_g	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_g	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_g	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$
1.75	6.56	45	39.4	39.3	39.4	1.75	5.68	25	39.0	39.1	39.0	2.25	4.83	29	38.9	38.5	38.7
1.75	6.62	51	39.3	39.3	39.3	1.5	6.92	33	38.9	39.1	39.0	2.25	4.8	27	38.9	38.5	38.7
1.75	6.46	41	39.3	39.3	39.3	2	5.42	31	39.1	38.9	39.0	1.5	5.98	21	38.5	38.8	38.6
1.75	6.47	43	39.3	39.3	39.3	2	5.58	35	39.1	38.9	39.0	2.25	4.71	25	38.8	38.4	38.6
1.75	6.55	47	39.3	39.2	39.3	2	5.35	29	39.1	38.9	39.0	1.25	8.73	47	38.3	38.9	38.6
1.75	6.21	35	39.2	39.3	39.2	2	5.77	39	39.1	38.8	39.0	1.25	8.59	45	38.2	38.9	38.6
1.75	6.33	37	39.2	39.2	39.2	2	5.54	33	39.1	38.9	39.0	1.25	8.99	51	38.2	38.9	38.6
1.75	6.15	33	39.2	39.2	39.2	1.5	6.71	29	38.8	39.1	39.0	1.5	5.64	19	38.4	38.7	38.6
1.75	6.53	39	39.2	39.2	39.2	1.75	5.59	23	38.9	39.0	39.0	1.25	8.59	43	38.2	38.9	38.6
1.5	7.14	37	39.1	39.3	39.2	1.5	6.58	27	38.8	39.1	38.9	1.25	8.87	49	38.2	38.9	38.6
1.5	7.44	45	39.1	39.3	39.2	2	5.32	27	39.0	38.8	38.9	1.25	8.56	41	38.2	38.9	38.6
1.5	7.33	43	39.1	39.3	39.2	2	5.1	25	38.9	38.8	38.9	1.25	8.06	37	38.2	38.9	38.5
1.75	6.08	31	39.2	39.2	39.2	2.25	5.14	43	39.1	38.6	38.8	2.25	4.53	23	38.7	38.4	38.5
1.75	6.72	49	39.2	39.2	39.2	1.5	6.33	25	38.7	39.0	38.8	1.75	4.96	17	38.4	38.6	38.5
1.5	7.62	51	39.1	39.3	39.2	1.75	5.34	21	38.7	38.9	38.8	2	4.51	17	38.5	38.5	38.5
1.75	5.99	29	39.1	39.2	39.2	2.25	5.07	39	39.0	38.6	38.8	2.25	4.48	21	38.6	38.3	38.5
2	5.91	51	39.3	39.0	39.2	1.75	5.23	19	38.8	38.9	38.8	1.25	8.53	39	38.2	38.8	38.5
1.5	7.31	41	39.0	39.3	39.1	2.25	5.2	47	39.0	38.6	38.8	1.25	7.66	31	38.1	38.8	38.4
2	5.66	41	39.2	39.0	39.1	2.25	5.17	51	39.0	38.6	38.8	2.5	4.37	29	38.7	38.2	38.4
1.5	7.54	47	39.0	39.2	39.1	1.5	6.21	23	38.6	38.9	38.8	1.25	7.99	35	38.1	38.8	38.4
2	5.79	47	39.2	39.0	39.1	2.25	5.08	41	39.0	38.6	38.8	2.25	4.29	19	38.6	38.3	38.4
2	5.73	43	39.2	39.0	39.1	2.25	5.05	37	39.0	38.6	38.8	2	4.29	15	38.4	38.4	38.4
1.5	6.83	31	39.0	39.2	39.1	2	4.97	23	38.8	38.7	38.8	1.25	7.9	33	38.1	38.7	38.4
2	5.62	37	39.2	39.0	39.1	2.25	5.14	45	39.0	38.5	38.8	2.5	4.31	27	38.6	38.1	38.4
2	5.8	45	39.2	39.0	39.1	2	4.92	21	38.8	38.7	38.8	2.5	4.46	31	38.7	38.1	38.4
1.5	6.99	35	38.9	39.2	39.1	2.25	5.02	35	39.0	38.5	38.7	2.5	4.28	25	38.6	38.1	38.4
2	5.92	49	39.2	38.9	39.1	2.25	5.18	49	39.0	38.5	38.7	1.75	4.6	15	38.2	38.5	38.3
1.5	7.39	39	39.0	39.2	39.1	2	4.69	19	38.8	38.7	38.7	1.5	5.38	17	38.1	38.4	38.3
1.5	7.76	49	39.0	39.1	39.1	2.25	4.99	33	38.9	38.5	38.7	2.25	4.21	17	38.4	38.2	38.3
1.75	5.95	27	39.0	39.1	39.1	2.25	4.89	31	38.9	38.5	38.7	1.25	7.35	27	37.9	38.6	38.2

Tabla 5.8: Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 163 calculados para $\gamma = 0.98$. Clima de Múnich. La eficiencia se expresa en %.

Con la finalidad de realizar una comparativa de la energía capturada por el FMSC en relación a la tecnología actual, en la Tabla 5.9 se expone la energía ganada por el FMSC para el diseño más eficiente de cada clima y orientación. Se comparan estos valores con el colector de tubos de vacío que se ha tomado como referencia. En el caso del colector de tubos de vacío se considera orientación NS por capturar más energía que en el caso EO en los climas analizados. Se puede observar que, en todos los climas y orientación, la energía ganada por el FMSC para una temperatura de trabajo de 200°C es superior al colector tomado como referencia, llegando a alcanzar hasta un 19 % en el caso de Múnich, un 18 % en el caso de Palma de Mallorca, y un 14 % en el caso de El Cairo. Se ha considerado también una inclinación $\beta_c=15^{\circ}$ para el captador de tubos de vacío tomado como referencia.

a)	Clima y orientación	Energía anual por unidad de superficie FMSC
	El Cairo NS	671 kWh/m ²
	El Cairo EO	656 kWh/m ²
	Palma de Mallorca NS	493 kWh/m ²
	Palma de Mallorca EO	482 kWh/m ²
	Múnich NS	229 kWh/m ²
	Múnich EO	229 kWh/m ²

b)	Clima y orientación	Energía anual por unidad de superficie colector tubos de vacío
	El Cairo NS	591 kWh/m ²
	Palma de Mallorca NS	419 kWh/m ²
	Múnich NS	192 kWh/m ²

Tabla 5.9: Energía ganada por unidad de superficie. En todos los casos $\beta_c = 15^{\circ}$. a): Caso más eficiente del FMSC. b): Colector tubos de vacío tomado como referencia

Si bien hasta ahora se ha analizado el comportamiento térmico del FMSC para diferentes orientaciones y climas, a continuación se exponen los valores promedios de la eficiencia térmica anual $\bar{\eta}$ para los tres climas y las dos orientaciones considerados, con el objetivo de encontrar diseños que pudieran ser óptimos para cualquier orientación y clima. A pesar de que el valor de $\bar{\eta}$ carece de sentido físico, y teniendo en cuenta que no es totalmente representativo ya que sólo se han considerado tres climas, dos orientaciones, y un ángulo de inclinación $\beta_c=15^{\circ}$, se

puede considerar cuanto menos indicativo para identificar un diseño óptimo para cualquier orientación y clima. Así pues, se procede a analizar la eficiencia media $\bar{\eta}$ de los climas y orientaciones considerados.

Los diseños más eficientes en promedio están caracterizados por valores en el rango $F/W=1.5$ - 2.25 y valores en el rango de $N=23$ - 51 ; correspondiendo a un rango de concentraciones geométricas $C_g=5.1$ - 7.6 . En la Tabla 5.10 se exponen los 42 valores que presentan mayor interés, que pertenecen a aquellos diseños que maximizan la energía capturada promediada $\bar{\eta}$ para todos los casos minimizando los valores de F/W y N con la finalidad de simplificar los diseños constructivos de los mismos. Los diseños que se exponen abarcan todo el rango de eficiencia promedio obtenido para todos los casos analizados. El diseño más eficiente en promedio de todos los casos analizados, para cualquier orientación y clima, es el que corresponde a los valores $F/W=1.75$, $N=35$ y $\gamma=0.98$ con una concentración geométrica $C_g=6.21$. Desde el punto de vista constructivo, diseños con valores de F/W y N bajos son interesantes por simplicidad de diseño constructivo a la hora de fabricar un concentrador solar. Los valores marcados en negrita en la Tabla 5.10 corresponden a aquellas combinaciones de parámetros, con eficiencias próximas a la máxima, de valores F/W y N reducidos.

F/W	C_g	N	$\bar{\eta}$	F/W	C_g	N	$\bar{\eta}$	F/W	C_g	N	$\bar{\eta}$
1.75	6.21	35	43.6	1.25	8.06	37	42.9	1.5	3.65	9	41.5
1.75	5.99	29	43.5	1.75	4.6	15	42.8	1.75	2.92	7	41.2
1.5	7.14	37	43.5	1.25	7.66	31	42.8	1.25	4.39	11	41.1
1.75	5.68	25	43.4	1.75	4.32	13	42.7	2.5	2.06	5	41.0
1.5	6.83	31	43.4	1.25	7.35	27	42.6	2.25	2.12	5	40.9
1.75	5.59	23	43.3	1.25	6.8	23	42.5	1.5	3.02	7	40.7
1.5	6.71	29	43.3	2	3.68	11	42.5	2	2.19	5	40.7
2	4.69	19	43.3	1.75	3.91	11	42.4	1.25	3.79	9	40.6
1.75	5.23	19	43.2	2	3.29	9	42.1	1.75	2.25	5	40.2
1.5	6.33	25	43.2	1.5	4.17	11	42.0	1	6.7	19	39.7
1.5	6.21	23	43.1	1.75	3.5	9	41.9	1.25	3.11	7	39.7
2.25	4.29	19	43.1	2.5	2.56	7	41.6	1.5	2.29	5	39.5
1.5	5.64	19	43.0	1.25	4.91	13	41.6	1.25	2.33	5	38.2
2	4.29	15	43.0	2	2.79	7	41.5	1	2.31	5	36.2

Tabla 5.10: Valores que toman los parámetros de diseño y los valores promedio de la eficiencia térmica anual para las orientaciones NS y EO y los tres climas considerados. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio $\bar{\eta}$. Se exponen los 42 casos que presentan mayor interés desde el punto de vista de diseño. En todos los casos $\gamma = 0.98$. La eficiencia se expresa en %.

5.5. Conclusiones

Se ha realizado un análisis paramétrico del FMSC para valores de F/W entre 1 y 3, con número de espejos N entre 5 y 51, y factores de intercepción γ entre 0.92 y 0.98. Se ha considerado una calidad óptica de los espejos caracterizada por $\sigma_b=8$ mrad. También se ha considerado el tamaño angular del Sol con $CSR=0.05$.

Los factores de concentración más elevados se obtienen para valores bajos de F/W . El máximo factor de concentración disminuye de 14.05 a 10.75 cuando γ aumenta de 0.92 a 0.98. Contrariamente, la máxima eficiencia óptica en incidencia normal se alcanza para $\gamma=0.98$ con un valor del 78 % y disminuye hasta 73 % para $\gamma=0.92$.

Se han obtenido las curvas IAM transversal y longitudinal. Se ha visto que cada parámetro de diseño afecta de manera diferente. Valores grandes de F/W afectan positivamente en el IAM transversal, mientras que lo hacen de manera negativa en el IAM longitudinal. En cambio a medida que el número de espejos aumenta afecta negativamente en ambos casos del IAM. El aumento del factor de intercepción sólo afecta positivamente en el IAM longitudinal, mientras que no afecta de manera significativa en el IAM transversal.

Se ha demostrado que la factorización simple del IAM subestima la energía óptica capturada por el receptor. Se ha introducido un término analítico en la factorización que permite una predicción más exacta que en el caso simple. Aún así esta aproximación causa errores elevados para ángulos transversal y longitudinal elevados.

Se ha analizado la densidad de radiación en el receptor para cuatro casos de diseño. Se ha visto que toma una forma simétrica y que el pico máximo depende de N y F/W . A medida que N aumenta se alcanza un pico mayor, y a medida que F/W aumenta el pico disminuye. Pueden alcanzarse valores pico de 20 soles dependiendo del caso analizado en función de los parámetros de diseño.

Se ha analizado el comportamiento térmico del FMSC para tres climas diferentes a una temperatura de trabajo de 200°C. Independientemente del clima, los diseños óptimos vienen dados para el valor de $\gamma=0.98$, y $F/W=2.00-2.25$ para orientación NS y $F/W=1.25-1.75$ para orientación EO. Existe un valor óptimo del número de espejos para cada valor de F/W . El valor $F/W=1.0$ presenta poco interés.

Se pueden obtener valores de hasta un 48.5 % para la eficiencia térmica anual en climas de alta radiación directa (El Cairo). En climas de baja radiación directa se pueden obtener valores de casi el 40 %. El diseño más eficiente independientemente del clima y de la orientación está caracterizado por los valores $F/W=1.75$, $N=35$ y $\gamma=0.98$ con una concentración geométrica de $C_g=6.21$.

Desde el punto de vista de diseño, dos casos presentan mucho interés, ya que tan solo tienen una disminución del 3.7 % y 5.7 % relativo a la máxima eficiencia promediada y por tener valores bajos en los parámetros de diseño. Respectivamente estos dos diseños son:

- $F/W=1.50$, $N=11$, $\gamma=0.98$
- $F/W=1.25$, $N=11$, $\gamma=0.98$

Se ha visto que los rangos escogidos para los valores que toman cada uno de los parámetros de diseño han sido los adecuados, ya que han permitido conocer el comportamiento tanto óptico como térmico del FMSC, y al mismo tiempo haber encontrado diseños que optimizan la energía capturada para aplicaciones en el rango de media temperatura.

Para finalizar, la energía capturada por el FMSC a 200°C es entre un 14 % y 19 % superior a la energía capturada por el colector de tubos de vacío tomado como referencia dependiendo de la localidad considerada.

Capítulo 6

Análisis del FMSC con espejos curvos: CSFMSC

En este Capítulo se analiza una geometría basada en el FMSC pero con N espejos parabólicos: *Curved Slats Fixed Mirror Solar Concentrator* (CSFMSC). Se determina la influencia de los parámetros de diseño en el IAM y en la eficiencia térmica. Se presentan las curvas del modificador de ángulo IAM, se discute su factorización para cualquier posición del sol, se analiza la distribución de radiación en el receptor, y se determina la eficiencia térmica anual para tres localidades diferentes. La temperatura de trabajo considerada del fluido caloportador es de 200°C.

6.1. Antecedentes

El diseño básico del FMSC establece que los espejos son planos. Por otro lado, del análisis anterior se ha visto que cuantos menos escalones (bajo número de N) mejor comportamiento óptico (IAM mayor), y cuantos más espejos mayor concentración y menos pérdidas térmicas. La geometría del FMSC no permite combinar estos dos efectos de manera independiente, puesto que al disminuir uno aumenta el otro. Los estudios de los años setenta de Russell Jr (1976) muestran que incorporando un concentrador secundario en el receptor se minimiza el tamaño del mismo, sin embargo las sombras generadas aumentan provocando una disminución de la energía aprovechable.

Ahora bien, con un diseño que fuera idéntico al FMSC pero cambiando los espejos planos por espejos parabólicos, de tal manera que para incidencia normal se reflejen todos los rayos hacia un mismo punto, cabría la posibilidad de combinar los dos efectos: se podría minimizar el receptor (aumentar la concentración) y a la vez disminuir el efecto de los escalones (disminuyendo el número de espejos). El diseño del FMSC con espejos parabólicos, llamado *Curved*

Slats Fixed Mirror Solar Concentrator (CSFMSC), es analizado por Balasubramanian and Sankarasubramanian (1993). El método de análisis está basado en el mismo método que el de Kumar (1974), realizando un cálculo analítico considerando espejos infinitesimales, y tiene en cuenta tanto los errores ópticos del concentrador con $\sigma_B=1-10$ mrad, como el tamaño angular del Sol. El estudio muestra que es posible alcanzar una concentración de aperturas $C_a=7$ para el CSFMSC frente a $C_a=6.76$ para el FMSC si se considera $\sigma_b=10$ mrad, en cambio si se considera $\sigma_b=2$ mrad se obtienen concentraciones de $C_a=21.3$ para el CSFMSC y de $C_a=14.3$ para el FMSC. Demostrando así que es posible aumentar la concentración del concentrador solar para el caso de espejos infinitesimales. Cabe ahora analizar el CSFMSC con espejos finitos curvos.

El trabajo presentado por Martínez et al. (2006) analiza el caso de un sólo espejo curvo con método de *ray-tracing* 3D. El error especular en los espejos y el tamaño angular del Sol no se tuvieron en cuenta. Por todo ello se procede a analizar el diseño CSFMSC con métodos de *ray-tracing* 3D teniendo en cuenta el error especular en los espejos con $\sigma_b=8$ mrad, y tamaño angular del Sol caracterizado con CSR=0.05. Se considera el tamaño finito de los espejos.

6.2. Objetivos

Los objetivos son (geometría CSFMSC):

- Calcular la eficiencia óptica en incidencia normal
- Calcular las curvas IAM para diferentes valores de los parámetros de diseño y analizar su factorización
- Conocer la distribución de radiación en el receptor
- Determinar la eficiencia térmica integrada anual para diferentes valores de los parámetros de diseño
- Conocer la influencia de las orientación NS y EO en el comportamiento del concentrador

6.3. Definición de la geometría

Para determinar la geometría del CSFMSC, es necesario conocer las expresiones matemáticas que definen los segmentos de parábola que forman el perfil de cada uno de los espejos. Tomando como referencia el mismo sistemas de coordenadas que se ha considerado en el Capítulo 3, ver Figura 3.7, el reflector que se define en este apartado vendrá dado por las siguientes restricciones:

1. El reflector es simétrico respecto al eje OZ
2. Todos los espejos curvos tienen la misma apertura a
3. Los espejos curvos tienen perfil parabólico
4. Los espejos son tangentes a los puntos (x_i, z_i) definidos para el caso del FMSC
5. Todas las parábolas tienen un foco común en el punto $x = 0, z = 2R$
6. Los espejos se colocan de tal manera que sus proyecciones en el eje OX no se superpongan, así se consigue minimizar la superficie reflectora

A continuación se procede a determinar la curva parabólica de cada espejo. Se aplica la misma restricción que en FMSC de reflector simétrico, por tanto solamente es necesario definir las parábolas en el eje positivo OX y la parábola central. La ecuación general de una parábola con distancia focal c_3 y vértice $x = c_1, z = c_2$, viene dada por:

$$z(x) = \frac{(x - c_1)^2}{4c_3} + c_2 \quad (6.1)$$

Es necesario determinar los coeficientes c_1, c_2 y c_3 para cada espejo etiquetado con el subíndice i : $c_{1,i}, c_{2,i}$ y $c_{3,i}$. Los valores x_i, z_i son conocidos por las Ecuaciones (3.2), (3.3), (3.4) y (3.5) mostradas en el Capítulo 3 para el círculo generatriz de radio R y origen en $x = 0, z = R$, ver Figura 3.7. Ahora, aplicando la primera restricción de reflector simétrico respecto al eje OZ el coeficiente $c_{1,i} = 0$.

Por otro lado, aplicando la tercera y cuarta restricción:

$$z_i = \frac{x_i^2}{4c_{3,i}} + c_{2,i} \quad (6.2)$$

Por último, y aplicando la quinta restricción se obtiene:

$$2R = c_{3,i} + c_{2,i} \quad (6.3)$$

Las Ecuaciones (6.2) y (6.3) determinan la geometría del reflector. Las restricciones segunda y sexta acotan los extremos de cada espejo parabólico. En este Capítulo también se define el parámetro F/W donde $F=2R$ como parámetro de diseño. También se considera la unidad de longitud $W=1$ u como en el caso FMSC.

En cuanto al tamaño del receptor, ahora puede tomar cualquier apertura, dado que las parábolas concentran la radiación solar en un punto (al margen del error de dispersión σ_B y tamaño angular del Sol). Entonces se escoge como parámetro para determinar el tamaño del receptor el ratio de aperturas C_a , Ecuación (2.55). Así pues los parámetros de diseño para el CSFMS son:

Número de espejos parabólicos : N

Ratio Foco Amplitud : F/W

Concentración de aperturas : C_a

La Figura 6.1 muestra la geometría de un concentrador solar CSFMSC con parámetros de diseños $N=3$, $F/W=1.0$, y $C_a=10$.

Las Figuras 6.2 y 6.3 muestran un trazado de rayos para el caso de $N=5$, $F/W=1.0$ y $C_a=10$. Se observa que este diseño intercepta una gran parte de la radiación directa incidente. Se ha considerado la dispersión de los espejos con $\sigma_B=8$ mrad, y tamaño angular del Sol $CSR=0.05$.

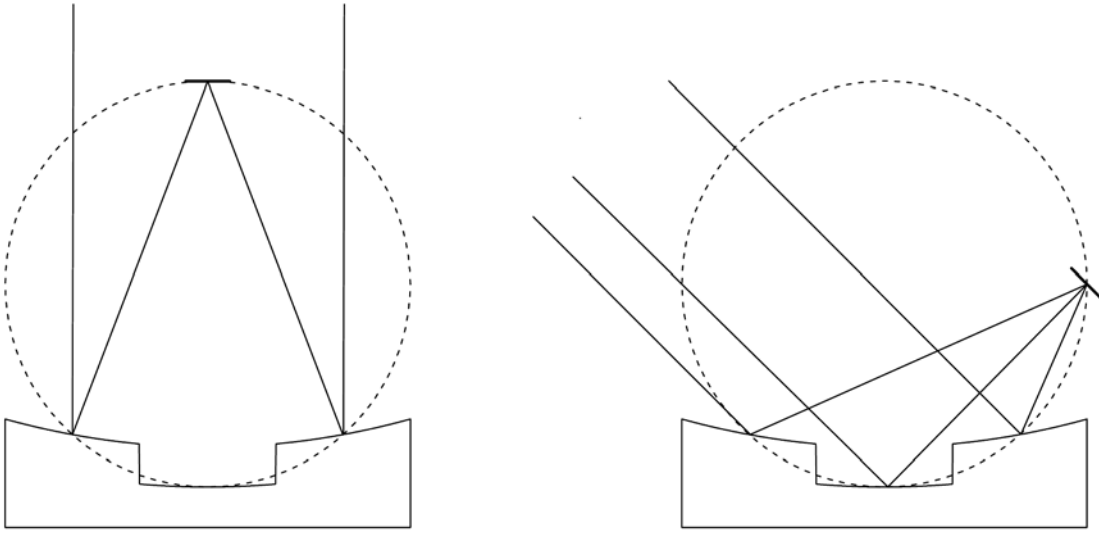


Figura 6.1: Reflector CSFMSC con ratio $F/W=1.0$ y $N=3$ espejos parabólicos de concentración $C_a=10$. Se observa el trazado de rayos para incidencia normal y para $\theta_t=45^\circ$. Se observa la propiedad de arco capaz para los puntos en común de las parábolas y el círculo generatriz.

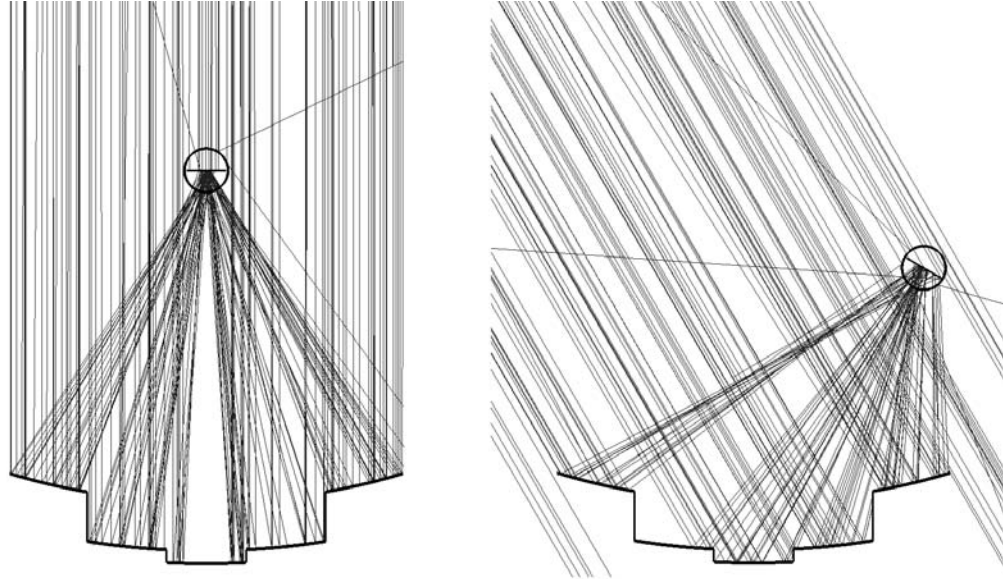


Figura 6.2: Concentrador solar CSFMSC de cinco espejos parabólicos, $N=5$, $F/W=1.0$, y $C_a=10$. Las parábolas concentran la radiación directa. Trazado de rayos para $\theta_t=0^\circ$ y $\theta_t=30^\circ$.

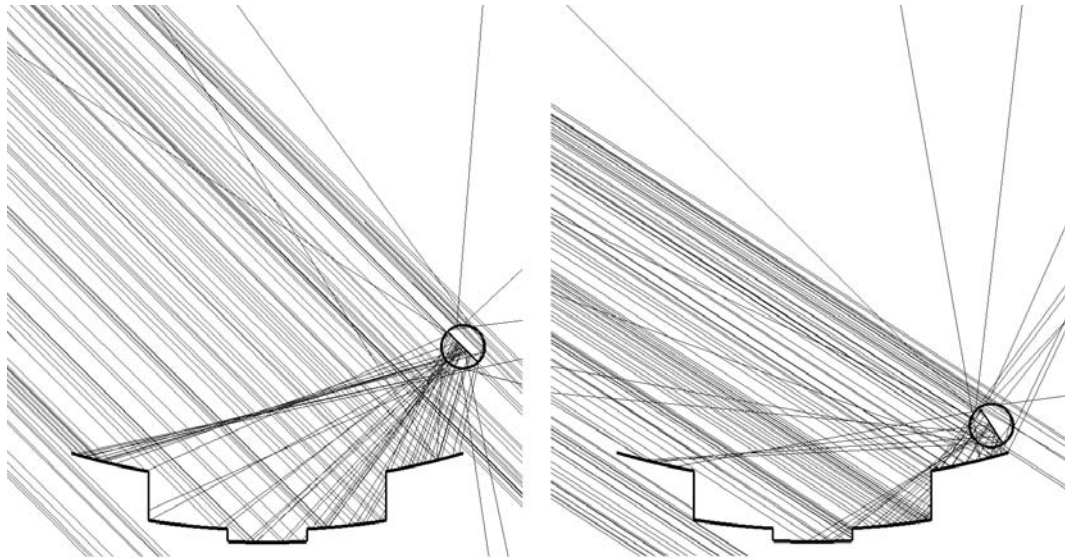


Figura 6.3: Concentrador solar CSFMSC de cinco espejos parabólicos, $N=5$, $F/W=1.0$, y $C_a=10$. Las parábolas concentran la radiación directa. Trazado de rayos para $\theta_t=45^\circ$ y $\theta_t=57^\circ$. El caso $\theta_t = 57^\circ$ corresponde al ángulo límite a partir del cual el receptor se queda inmóvil para ángulos de incidencia mayores, $\theta_{f,LIM}=114^\circ$.

6.4. Casos analizados

La geometría del CSFMSC depende de tres parámetros: N , F/W y C_a . Al igual que se hizo en el Capítulo 5, es necesario acotar los valores que toman los parámetros de diseño. Se han considerado los siguientes rangos de valores:

Número de espejos: $N = 1, 3, 5, 7$

Ratio Foco/Amplitud: $F/W = 1.0, 1.25, 1.5, \dots, 3.0$

Concentración de apertura: $C_a = 3, 4, \dots, 18, 20, 22, \dots, 30$.

En este Capítulo son analizados un total de 792 casos. El motivo por el cual no se consideran casos con un número mayor de espejos $N > 7$, se debe a que el principal objetivo de este Capítulo es minimizar, si es posible, el número de segmentos respecto al caso FMSC, sin reducir, o incluso incrementar, la eficiencia media alcanzada.

Partiendo del análisis realizado en el Capítulo 5, se ha considerado $\rho_{2\pi} = 0.92$, $\sigma_B = 8$ mrad para la dispersión angular de los espejos, el mismo receptor definido en el Capítulo 5, y el mismo tamaño angular del Sol $CSR = 0.05$. Lo que permite la comparación entre ambas geometrías.

6.5. Análisis óptico del CSFMSC. Resultados y discusión

Al igual que en Capítulo 5, la eficiencia óptica se obtiene a partir de las Ecuaciones (4.15), (5.2) y (5.3). Estas Ecuaciones son utilizadas en las siguientes Secciones.

6.5.1. Eficiencia óptica

En la Figura 6.4 se muestra la eficiencia óptica en incidencia normal para todos los casos estudiados. Se observa una fuerte dependencia con el ratio F/W . La eficiencia máxima se alcanza en todos los casos cuando la concentración en aperturas es mínima $C_a = 3$, tomando valores comprendidos entre el 81 % y el 82 %. Se observa un comportamiento ligeramente distinto para $N = 1.0$ frente a los otros casos, siendo este comportamiento ligeramente inferior a los demás casos. Por otro lado, se observa un fuerte descenso en la eficiencia óptica para el caso $F/W = 1.0$ a medida que la concentración aumenta. Este descenso cada vez es menor a medida que se aumenta el ratio F/W . No se ha considerado el factor de transferencia de calor $F_{av} = 0.95$ determinado en la Sección 4.5. En este cálculo numérico mediante *ray-tracing* se han emitido 200000 rayos para cada uno de los casos analizados.

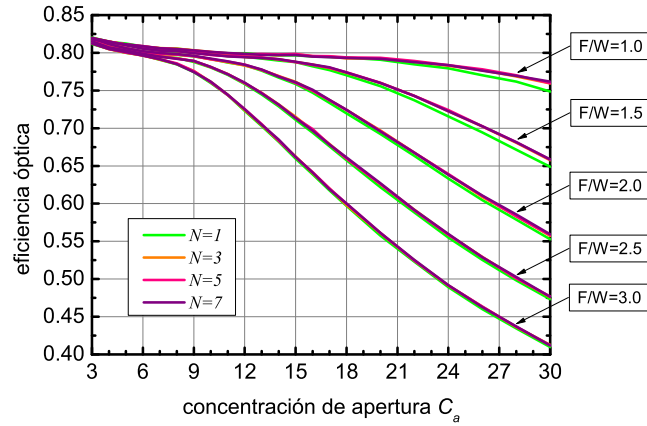


Figura 6.4: Eficiencia óptica en incidencia normal en función de la concentración de aperturas para diferentes valores de los parámetros de diseño adoptados

6.5.2. IAM transversal

Para el cálculo del modificador de ángulo transversal K_t , se han emitido 200000 rayos para cada posición del Sol en el rango de 0° - 80° en pasos de 1° . La simulación se realiza en 3D, la longitud axial del concentrador considerada es $L=1u$. Debido al gran número de casos calculados, en las Figuras 6.5, 6.6 y 6.7 se muestra una selección de las curvas obtenidas con la finalidad de analizar los efectos de cada uno de los parámetros de diseño.

En la Figura 6.5 se muestran los efectos del parámetro F/W . Se puede observar que a medida que F/W aumenta se obtiene un mayor IAM transversal. La influencia es mayor a medida que el factor de concentración C_a aumenta, pasando de valores bajos para $F/W=1.0$ a valores que superan la unidad para $F/W=3.0$ en los casos de $C_a = 15$ y 30 expuestos. Se obtienen curvas próximas a la unidad a baja concentración (caso de $C_a=7$), excepto el caso de $N=7$ espejos, esto se debe a que este diseño presenta más escalones en el reflector y por tanto los rayos interceptan con ellos en ángulos de incidencia elevados. Cabe destacar que cuando el receptor intersecciona con el reflector deja de realizar el seguimiento solar (ángulo $\theta_{f,LIM}$ de la Ecuación (3.10)) esto puede observarse en el descenso pronunciado en algunas de las curvas expuestas. Este efecto es más pronunciado para F/W pequeños, ya que la altura h del reflector es mayor (Figura 3.11c) y por tanto $\theta_{f,LIM}$ menor. Notar también que en algunos casos el IAM transversal es superior a la unidad, tal como pasaba en el diseño FMSC analizado en el Capítulo 5, esto se debe a que el receptor, una vez posicionado fuera de la proyección de la apertura del reflector, captura energía directamente del sol, incrementando así la energía interceptada respecto a la apertura del reflector. Este efecto se aprecia para ángulos de incidencia elevados y F/W grandes.

En la Figura 6.6 se muestra el efecto del factor de concentración C_a en el IAM transversal. Se puede observar que si se aumenta el factor C_a el IAM transversal decrece para valores de F/W y N bajos. Esto se debe a que el tamaño del receptor disminuye y por tanto se intercepta menos energía. Pero sin embargo, el comportamiento se invierte cuando el ángulo de incidencia supera los 30° para F/W y N elevados. Esto es debido a que el efecto de intercepción de los escalones es bajo para F/W alto, y al referenciar el IAM respecto a la eficiencia óptica en incidencia normal el comportamiento relativo es mayor cuando la concentración C_a aumenta (ya que la eficiencia óptica disminuye al aumentar C_a como puede verse en la Figura 6.4). Para finalizar, cabe notar que el IAM transversal es siempre superior a 0.9 para $F/W=3$ independientemente del número de espejos y de la concentración C_a .

Finalmente en la Figura 6.7 se expone el efecto del número de espejos parabólicos. En este caso no se observa una tendencia uniforme, ya que variaciones de los parámetros F/W y C_a modifican de forma muy importante la respuesta del sistema a variaciones del número de espejos N .

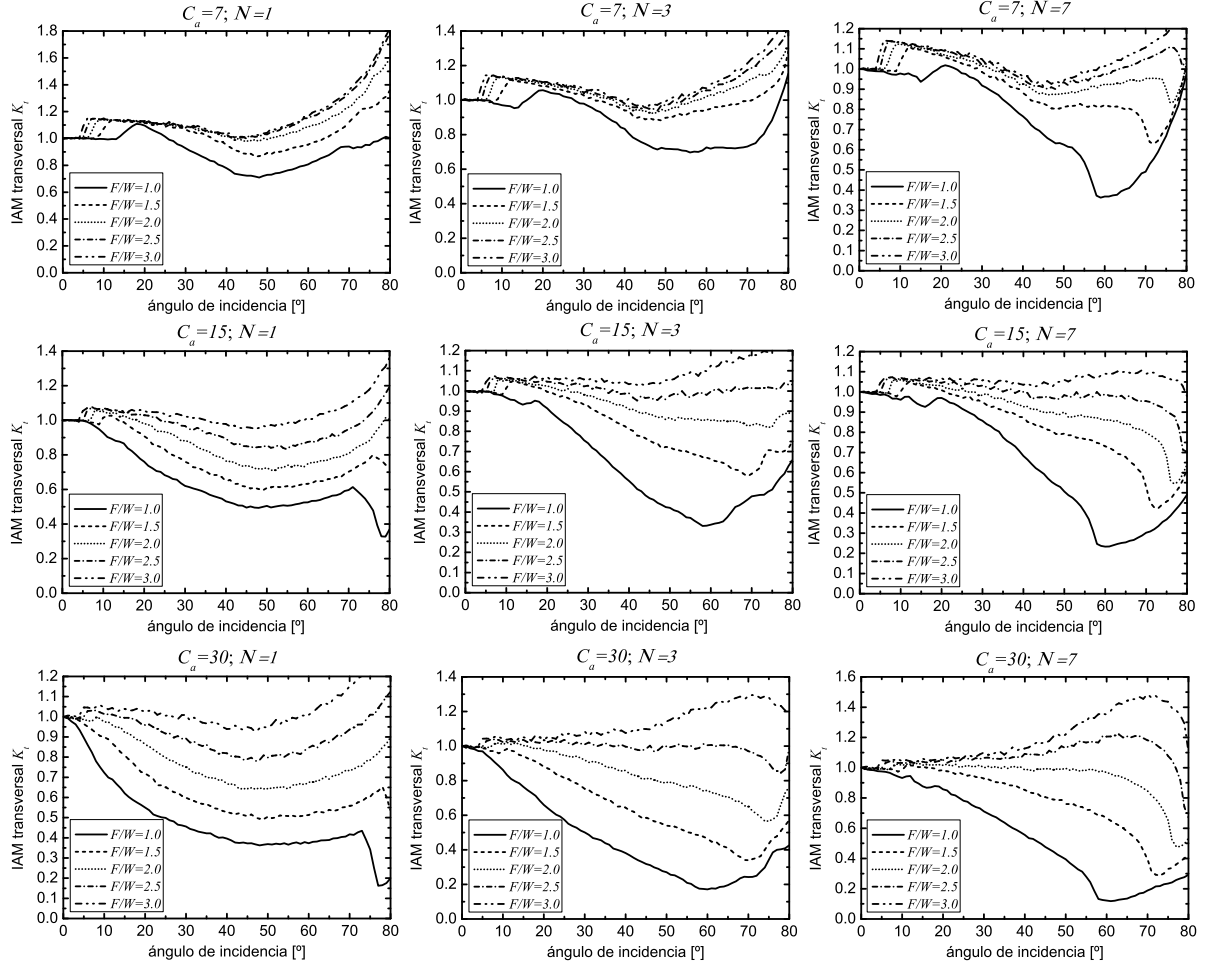


Figura 6.5: Curvas del IAM transversal dependiendo del valor de F/W para diferentes valores de C_a y N

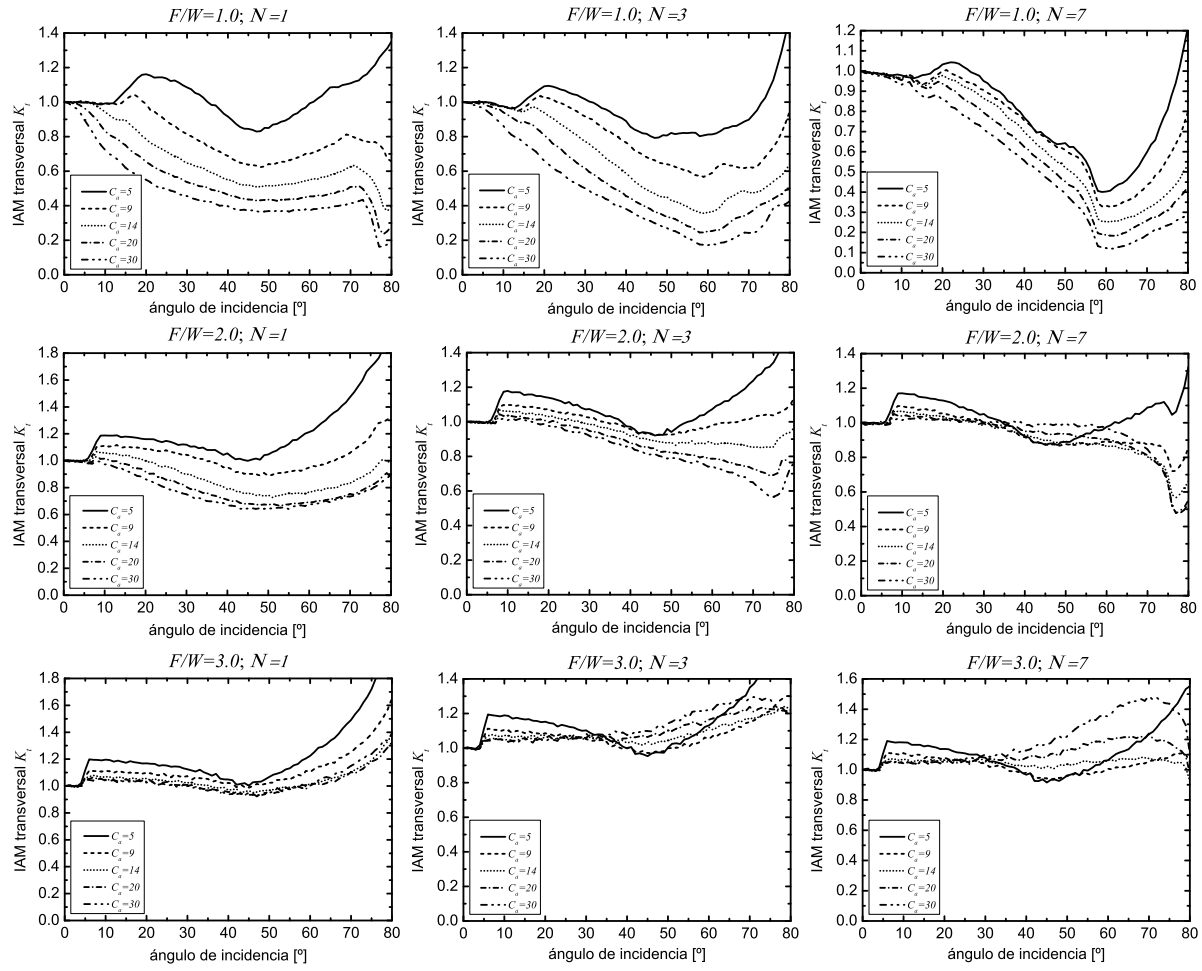


Figura 6.6: Curvas del IAM transversal dependiendo del valor de C_a para diferentes valores de F/W y N

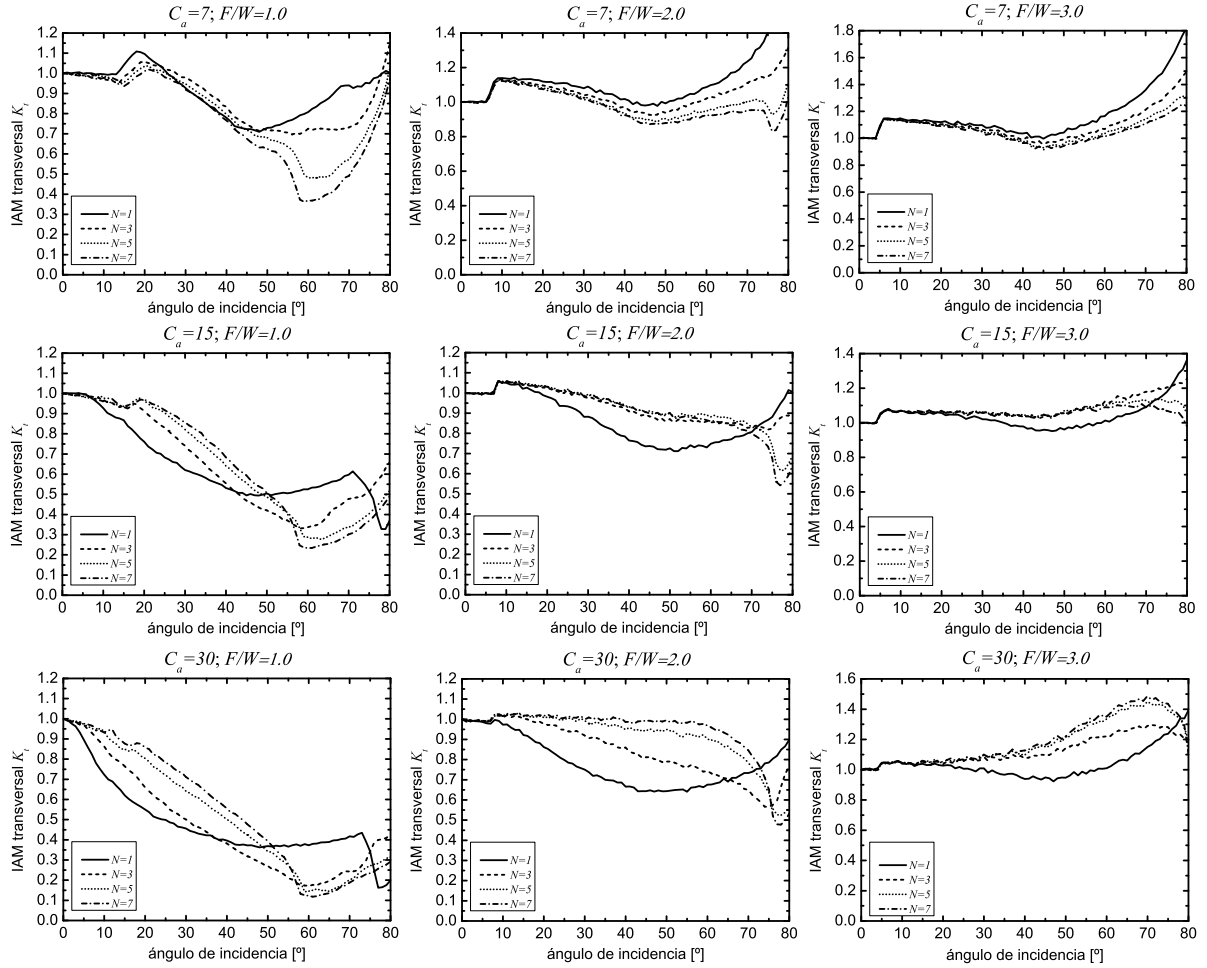


Figura 6.7: Curvas del IAM transversal dependiendo del valor de N para diferentes valores de C_a y F/W

6.5.3. IAM longitudinal

Para calcular el modificador de ángulo IAM longitudinal se ha supuesto una longitud del concentrador de $L=10$ u con la finalidad de apreciar los efectos de borde. Se han emitido 400000 rayos para cada posición del Sol en el plano axial de 0° a 80° con pasos de 1° . En las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10 se muestra la dependencia angular del IAM longitudinal para los mismos casos que en el IAM transversal de la Sección 6.5.2.

En la Figura 6.8 se puede observar que un incremento en el parámetro F/W produce una reducción en el IAM longitudinal. Esto se debe a que al incrementar el factor F/W la distancia entre el reflector y el receptor aumenta, y algunos rayos no alcanzan el receptor debido a las

pérdidas por los extremos.

En cuanto a la influencia de la concentración de aperturas C_a , se puede ver que a medida que aumenta este parámetro también aumentan las pérdidas en el IAM longitudinal, ver Figura 6.9. Esto se debe a que el tamaño del receptor disminuye al aumentar C_a y por tanto los rayos escapan de la intercepción del mismo. La influencia de los parámetros F/W y C_a tienen efectos similares como puede observarse en ambas figuras.

Finalmente, y en cuanto al número de espejos parabólicos N , en la Figura 6.10 se observa que los efectos en el IAM longitudinal son prácticamente despreciables; si bien es cierto que el IAM longitudinal para $N=1$ es el más bajo de todos (con una diferencia casi despreciable), siendo los otros casos de N iguales los unos a los otros, este efecto se aprecia más para $C_a=30$ y $F/W=1.0$.

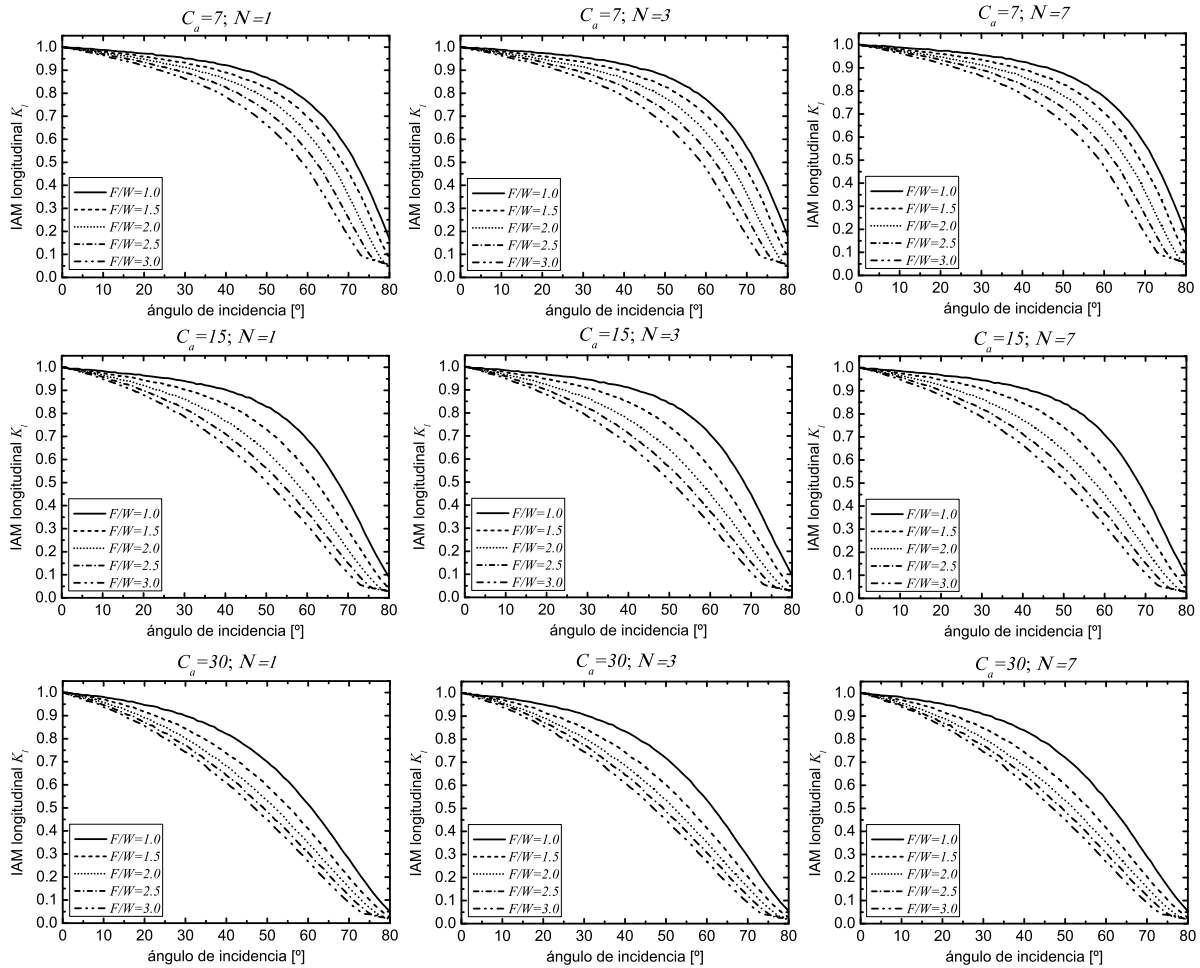


Figura 6.8: Curvas del IAM longitudinal dependiendo del valor de F/W para diferentes valores de C_a y N

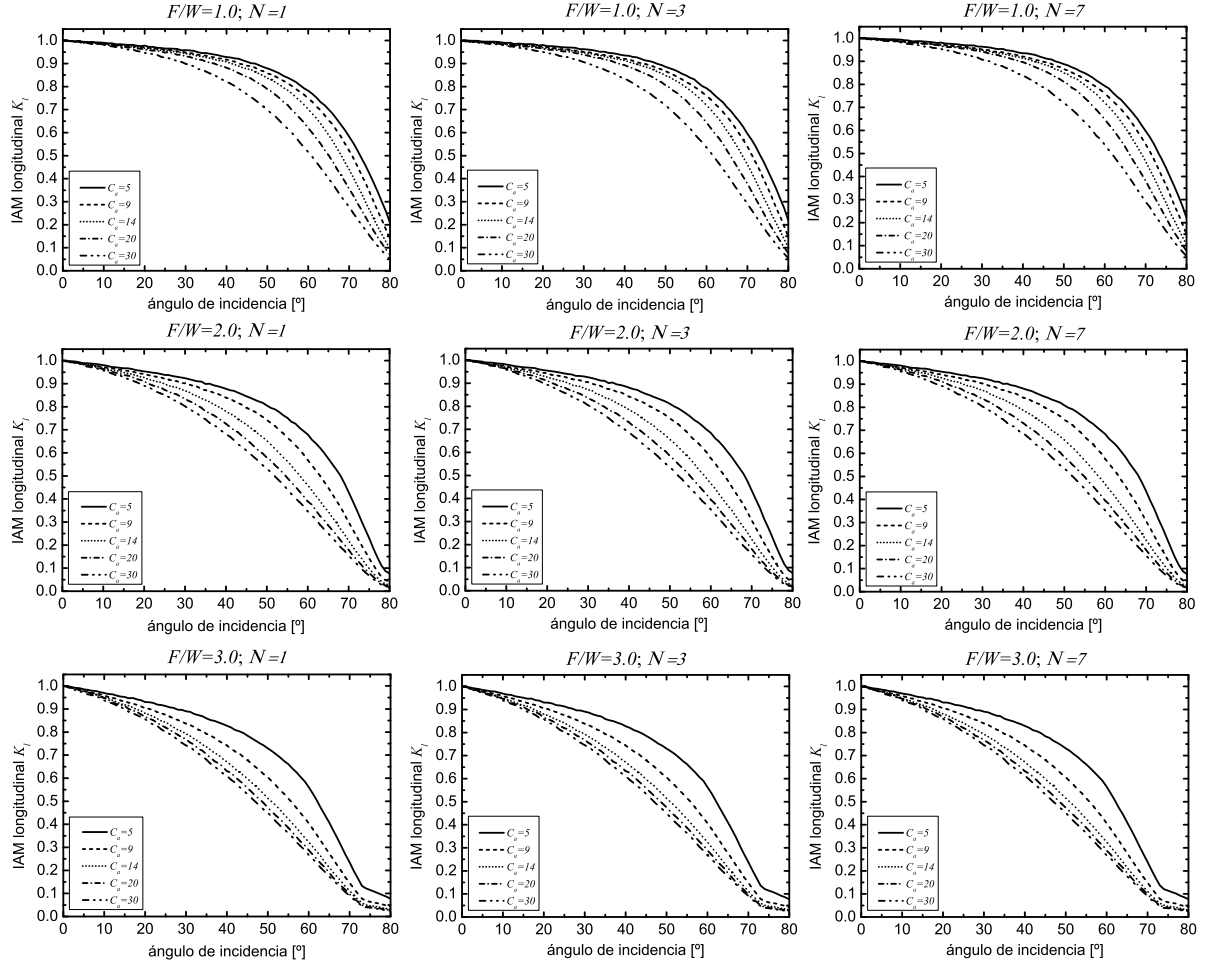


Figura 6.9: Curvas del IAM longitudinal dependiendo de la concentración C_a para diferentes valores de F/W y N

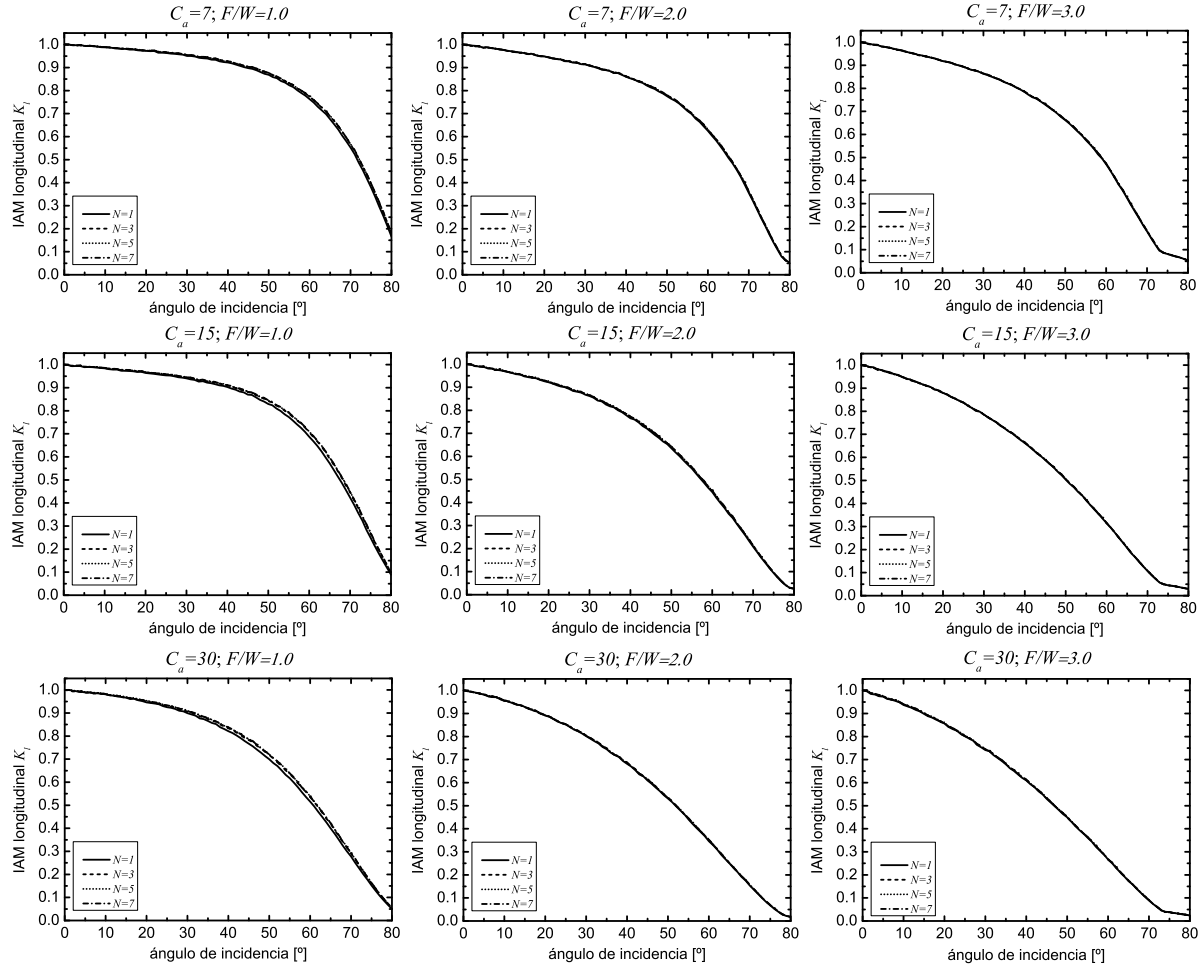


Figura 6.10: Curvas del IAM longitudinal dependiendo del número de espejos N para diferentes valores de C_a y F/W

6.5.4. Aproximación factorizada del IAM

En este apartado se realiza un análisis sobre la aproximación factorizada del IAM para el CSFMSC análogo al realizado en el Capítulo 5 para el FMSC. Se definen los mismos estimadores para el error ΔK , véase las Ecuaciones (5.5-5.8). Se tiene en cuenta también el factor $f(\theta_t, \theta_l)$ descrito en la Ecuación (5.9), ya que los efectos de borde en ambas geometrías son similares.

Para la comparación del IAM factorizado con el IAM teórico, se han escogido 160 casos al azar de los 792 casos estudiados. Se ha calculado el valor promedio de cada uno de los estimadores del error para los ángulos solares cenital y azimutal de 0° a 70° . En la Tabla 5.5 se muestran

los promedios de $RMSE$, MBE , MAE y ME . En vista de los resultados, la aproximación factorizada presenta una subestimación de la energía captada como puede verse por los valores negativos en MBE y ME . Con la nueva factorización propuesta, $K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$, los valores de $RMSE$, MBE , MAE y ME han disminuido y no se observa una clara subestimación del IAM, ver Tabla 6.1.

Aproximación IAM	$RMSE$	MBE	MAE [%]	ME [%]
$K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)$	0.0354	-0.0169	5.31	-4.82
$K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$	0.0214	-0.0028	3.14	-1.26

Tabla 6.1: Valores medios de los estimadores de error para la factorización simple y para la nueva factorización del IAM para 160 casos escogidos al azar

En la Figura 6.11a) se muestra la superposición de la factorización propuesta teórica y el IAM real para el caso correspondiente a los máximos MAE y ME obtenido en los 160 casos escogidos para este análisis. Se puede observar que ambos casos son muy similares para ángulos no muy alejados de incidencia normal. En la Figura 6.11b) se representa el error para este mismo caso. Se observan grandes diferencias para ángulos muy elevados tanto en la dirección transversal como en la dirección longitudinal. Esto es debido a que la aproximación factorizada no reproduce el valor real para ángulos de θ_t y θ_l elevados. Sin embargo, estos errores no tienen un efecto significativo en la estimación de la energía capturada, ya que se producen en ángulos donde, por una parte la energía incidente en el captador es bastante reducida, y por otra el valor del IAM es extremadamente bajo. Los picos del error se producen por la discontinuidad abrupta en el IAM transversal cuando el ángulo transversal es de 76° , momento en el que se da el contacto del receptor con los espejos y ya no se puede seguir el Sol ($\theta_{t,LIM} = 76^\circ$).

Otro caso está representado en las Figuras 6.12a) y 6.12b), con valores de $RMSE$, MBE , MAE y ME similar a los valores medios de los 160 casos analizados. La aproximación factorizada reproduce mejor el valor real que en el caso anterior.

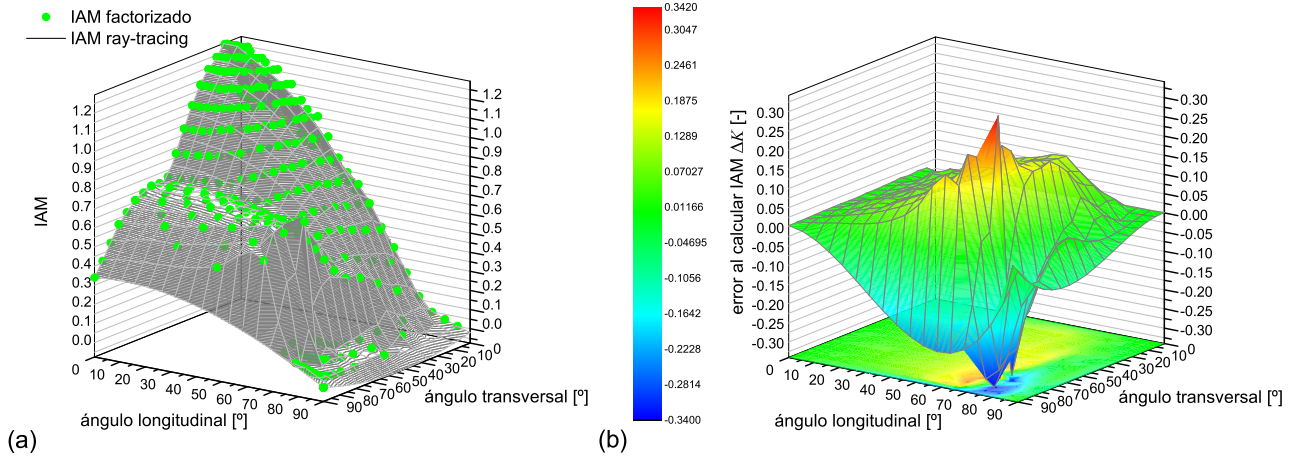


Figura 6.11: Caso analizado $N=1$, $F/W=3.0$ y $C_a=3$. Los valores en los estimadores del error son $RMSE=0.0614$, $MBE=-0.0206$, $MAE=7.68\%$ y $ME=7.55\%$. (a): IAM calculado por factorización y valor real mediante *ray-tracing*. (b): error al calcular IAM a partir de la factorización $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$ en lugar de $K(\theta_t, \theta_l)$

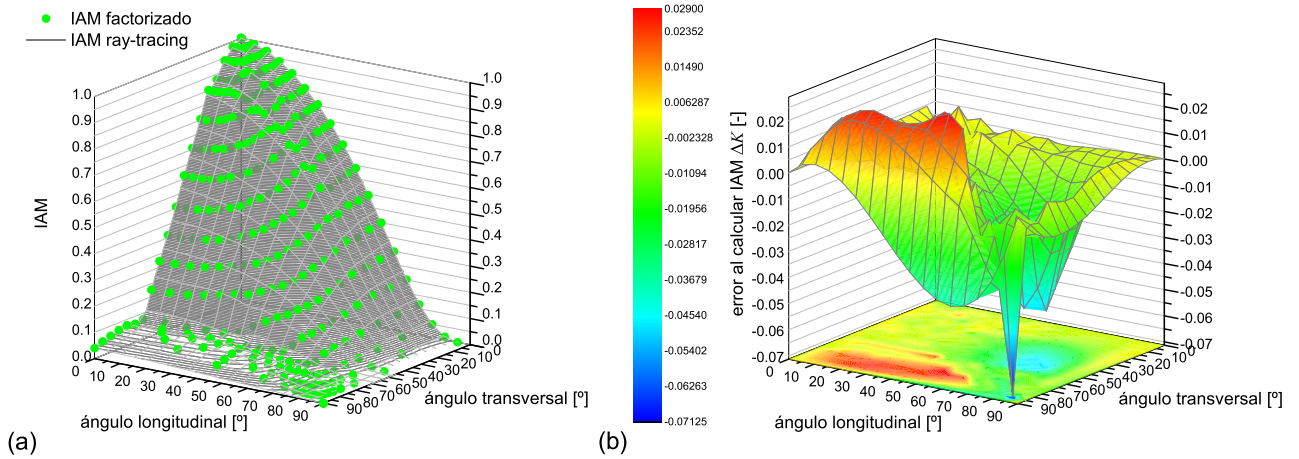


Figura 6.12: Caso analizado $N=7$, $F/W=1.00$ y $C_a=24$. (a): IAM calculado por factorización y valor real mediante *ray-tracing*. (b): error al calcular IAM a partir de la factorización $K \sim K(\theta_t, 0)K(0, \theta_l)f(\theta_t, \theta_l)$ en lugar de $K(\theta_t, \theta_l)$. Los valores en los estimadores del error son $RMSE=0.0109$, $MBE=-0.0035$, $MAE=3.47\%$ y $ME=-1.38\%$

6.5.5. Distribución de radiación en el receptor

Tal como se hizo en el Capítulo 5, se analiza la distribución de radiación en el receptor. La Figura 6.13 muestra la distribución de radiación en el receptor para los casos de $N=1, 3, 5$ y 7 espejos parabólicos para $F/W=1.5$ y $C_a=15$ cuando el ángulo de incidencia transversal es $\theta_t=0^\circ, 30^\circ$ y 60° . El receptor ha sido discretizado en cien segmentos y se han emitido un millón de rayos en cada caso.

Se observa que la concentración de radiación es simétrica para incidencia normal independientemente del número de espejos. Se observa también que la fracción de energía interceptada por el receptor alcanza casi un 98 % independientemente del número de espejos (en esta gráfica el factor de intercepción se define como la energía total interceptada en la posición del Sol considerada, no confundir con el parámetro γ utilizado en Capítulo 5 que se definía para el caso de incidencia normal). El máximo de concentración, que se sitúa alrededor de los 25 soles, es alcanzado también independientemente del número de espejos. En todos los casos se observa que la concentración de radiación disminuye a medida que aumenta el ángulo de incidencia solar, tal y como cabía esperar.

El caso de un espejo parabólico presenta mayores pérdidas de la energía interceptada a medida que el ángulo de incidencia es mayor, mostrando claramente una cola de la campana en uno de los extremos no despreciable alcanzando valores altos de concentración. Esto implica que para el caso de un espejo parabólico la posición del receptor no es la más apropiada y que se está escapando radiación concentrada proveniente del espejo parabólico. El caso de tres espejos parabólicos mejora sustancialmente la captura de energía respecto al caso de un solo espejo, pero también presenta pérdidas ópticas por los extremos. En cambio los casos de cinco y siete espejos parabólicos presentan una distribución de la radiación similar entre ellos cuyas colas de las campanas presentan valores bajos en la concentración de radiación, esto implica que casi toda la energía que proviene de los espejos es interceptada por el receptor. El hecho de que no se alcancen valores altos en la intercepción en estos casos es debido a la intercepción de los rayos reflejados con los escalones, se puede estimar una pérdida del $\sim 30\%$ como consecuencia de los escalones para $\theta_t = 60^\circ$ en estos casos. A medida que aumenta el ángulo de incidencia transversal aumenta ligeramente la asimetría en la distribución de radiación en el receptor. Para finalizar, y atendiendo al factor de intercepción γ para incidencia normal, se concluye que todos los casos interceptan casi un 98 % de la radiación incidente.

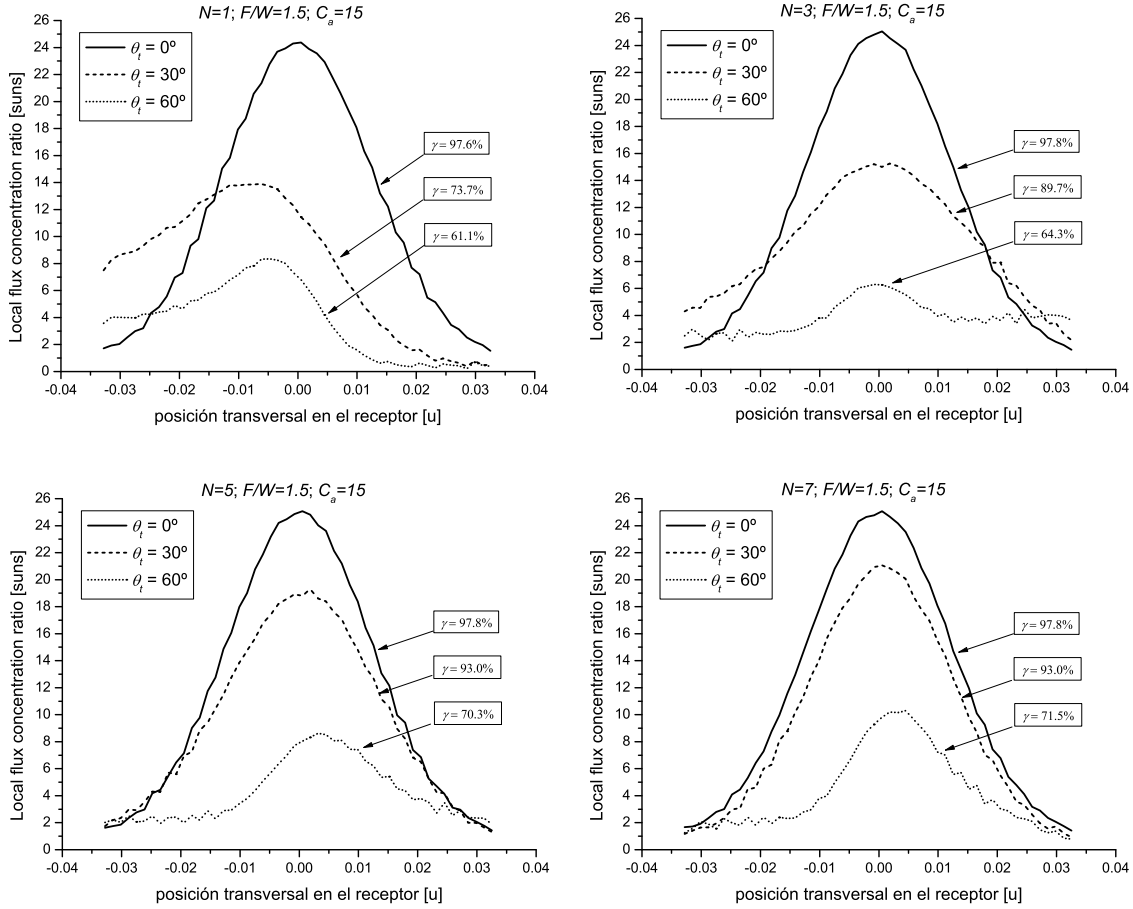


Figura 6.13: Distribución de la densidad de radiación en el receptor para $N=1, 3, 5$ y 7 espejos parabólicos

6.6. Eficiencia térmica del CSFMSC. Resultados y discusión

En esta Sección se realiza un estudio térmico del CSFMSC con el mismo procedimiento que el descrito en el Capítulo 5. Se exponen los resultados de la eficiencia térmica anual para una temperatura de trabajo de 200°C considerando los tres climas descritos en el Capítulo 4: Palma de Mallorca (Lat= 39.5°N), Múnich (Lat= 48.1°N) y El Cairo (Lat= 30.1°N). Para cada una de las localidades se ha analizado las orientaciones NS y EO, con una inclinación de 15° en ambos casos. La eficiencia térmica anual $\eta_{b,a}$ respecto la radiación directa en el plano del captador viene dada por la expresión (5.11).

Se ha comparado el comportamiento térmico del CSFMSC con el del captador de tubos de vacío escogido como referencia en el Capítulo 4 (tubos de vacío considerados para determinar los coeficientes de pérdida para el receptor del CSFMSC). La orientación del captador de referencia es la misma que la considerada en el CSFMSC.

La eficiencia térmica anual para los diferentes climas considerados se presenta en las Figuras 6.14, 6.16 y 6.18 para orientación NS y en las Figuras 6.15, 6.17 y 6.19 para orientación EO. Estas gráficas muestran, para cada valor del número de espejos parabólicos $N=1, 3, 5$ y 7 , las curvas de cada valor de $F/W=1.00, 1.25, 1.50, 2.00, 2.50$ y 3.00 . Las curvas para los valores de $F/W=1.75, 2.25$ y 2.75 no se exponen para mayor simplicidad del gráfico y no aportar información de tendencia. Aún así estos casos también han sido calculados para su posterior discusión.

En todos los casos se observa que existe un valor óptimo del ratio de aperturas C_a para el cual la eficiencia térmica anual es máxima. Esto indica que existe un valor de C_a para cada par de valores de N y de F/W óptimo. Este valor óptimo de C_a también depende de la orientación del concentrador y el clima considerado en la integración. Dada la gran cantidad de casos analizados, y diferencias observadas en el comportamiento, se discute en primer lugar el caso de un espejo parabólico $N=1$.

Para $N=1$, en los tres climas analizados, se observa que valores comprendidos entre $F/W=2.00-2.50$ son óptimos para orientación NS, y valores de $F/W=1.50-2.5$ son óptimos para orientación EO; las concentraciones en apertura están comprendidas en el rango $C_a=7-8$ en ambas orientaciones. En cuanto al diseño con tres espejos parabólicos $N=3$ y orientación NS se encuentran valores óptimos para $F/W=2.0$ y $C_a=10$. Sin embargo para orientación EO existe más disparidad, valores de $F/W=1.25-1.50$ y $C_a=10-15$ presentan buen comportamiento para esta orientación. El caso de cinco espejos parabólicos $N=5$ presenta óptimos parecidos al caso anterior, se observa que $F/W=2.0$ y $C_a=10$ es óptimo para orientación NS y valores de $F/W=1.25-1.50$ con concentraciones en apertura comprendidas en el rango $C_a=11-15$ son óptimos para orientación EO. Para finalizar, en cuanto al diseño con siete espejos parabólicos $N=7$, valores comprendidos de $F/W=1.50-2.50$ son óptimos para orientación NS y valores comprendidos en el rango $F/W=1.25-1.50$ son óptimos para orientación EO; las concentraciones en apertura son muy dispares, están comprendidas entre $C_a=8-15$ para orientación NS y $C_a=12-15$ para orientación EO. Se observa que el CSFMSC alcanza mayores eficiencias en orientación NS que en orientación EO, esta diferencia superior es del orden de un 2 %.

En el caso de Palma de Mallorca el valor máximo que se obtiene para la eficiencia térmica anual en orientación NS es de $\eta_{b,a}=47.0\%$, que se obtiene para valores de $N=1$, $F/W=2.25$ y $C_a=7$. En la orientación EO el máximo se obtiene en $\eta_{b,a}=44.6\%$ para el caso $N=3$, $F/W=1.5$ y $C_a=11$. Con la finalidad de encontrar un par de valores para N y F/W óptimos para el clima de Palma de Mallorca, en la Tabla 6.2 se exponen las eficiencias térmicas en las dos orientaciones y también su promedio, $\bar{\eta}_{b,a}$. Puede tomarse como diseño óptimo aquel diseño que alcanza un valor máximo promedio entre ambas orientaciones, dado que un concentrador solar basado en la geometría del CSFMSC tanto podrá instalarse en orientación NS como

en orientación EO. Los datos expuestos en la Tabla 6.2 están ordenados de mayor a menor eficiencia promedio. Se han expuesto los 90 diseños más eficientes en promedio de un total de 792 casos. Los diseños más eficientes pertenecen al caso de un espejo parabólico caracterizados por valores en el rango $F/W=2.00-2.25$ y valores de concentraciones de apertura $C_a=7-8$. Merece especial atención el caso de un espejo parabólico con factor $F/W=1.5$ y $C_a=7$ con una eficiencia promedio del 44.8 %, dado que toma valor bajo de F/W , y se sitúa cerca de la eficiencia máxima promedio del 45.5 % cuyo diseño implica un mayor valor de $F/W=2.00$.

En el caso de un clima de alta radiación directa, El Cairo, el valor máximo que se obtiene para la eficiencia térmica anual en orientación NS es de $\eta_{b,a}=51.4\%$, cuyos parámetros de diseño correspondientes son los mismos que en el caso del clima de Palma de Mallorca, $N=1$, $F/W=2.25$ y $C_a=7$. En orientación EO el máximo se obtiene en $\eta_{b,a}=49.3\%$ para el caso $N=1$, $F/W=2.00$ y $C_a=7$. En la Tabla 6.3 se exponen las eficiencias térmicas en las dos orientaciones y también su promedio, están ordenados de mayor a menor eficiencia promedio para los 90 casos más eficientes. Al igual que en el clima de Palma de Mallorca, los diseños más eficientes pertenecen al caso de un espejo parabólico caracterizados por valores en el rango $F/W=2.00-2.25$ y valores de concentraciones de apertura $C_a=7-8$. También merece especial atención el caso de un espejo parabólico con factor $F/W=1.5$ y $C_a=7$, con una eficiencia promedio del 49.4 %, dado que toma valor bajo de F/W y se sitúa cerca de la eficiencia máxima promedio del 50.3 % cuyo diseño implica un mayor valor de $F/W=2.00$.

En el caso de un clima con baja radiación directa, Múnich, el valor máximo que se obtiene para la eficiencia térmica anual en orientación NS es de $\eta_{b,a}=41.3\%$, cuyos parámetros de diseño correspondientes son similares a los dos casos anteriores: $N=1$, $F/W=2.25$ y $C_a=8$. En la orientación EO el máximo se obtiene en $\eta_{b,a}=40.7\%$ para un caso similar en el clima de El Cairo, $N=1$, $F/W=2.00$ y $C_a=8$. En la Tabla 6.4 se exponen las eficiencias térmicas en las dos orientaciones y también su promedio, están ordenados de mayor a menor eficiencia promedio para los 90 casos más eficientes. Se observa también que los diseños más eficientes pertenecen al caso de un espejo parabólico caracterizados por valores en el rango $F/W=2.00-2.25$ y valores de concentraciones de apertura $C_a=7-8$. Aunque diseños de tres espejos parabólicos también presentan eficiencias muy elevadas, como son los casos de $F/W=1.75-2.00$ y $C_a=10-11$. También merece especial atención el caso de un espejo parabólico con factor $F/W=1.5$ y $C_a=7$ con una eficiencia promedio del 40.0 %, dado que toma valor bajo de F/W , y se sitúa cerca de la eficiencia máxima promedio del 41.0 % cuyo diseño implica un mayor valor de $F/W=2.00$.

Se observa, según los climas analizados con latitudes de 30.1°N , 39.5° y 48.1° , una disminución del orden del 4.5 % absoluto en la eficiencia térmica promedio al pasar de una localidad a otra localidad con una latitud de $\sim 10^\circ$ superior.

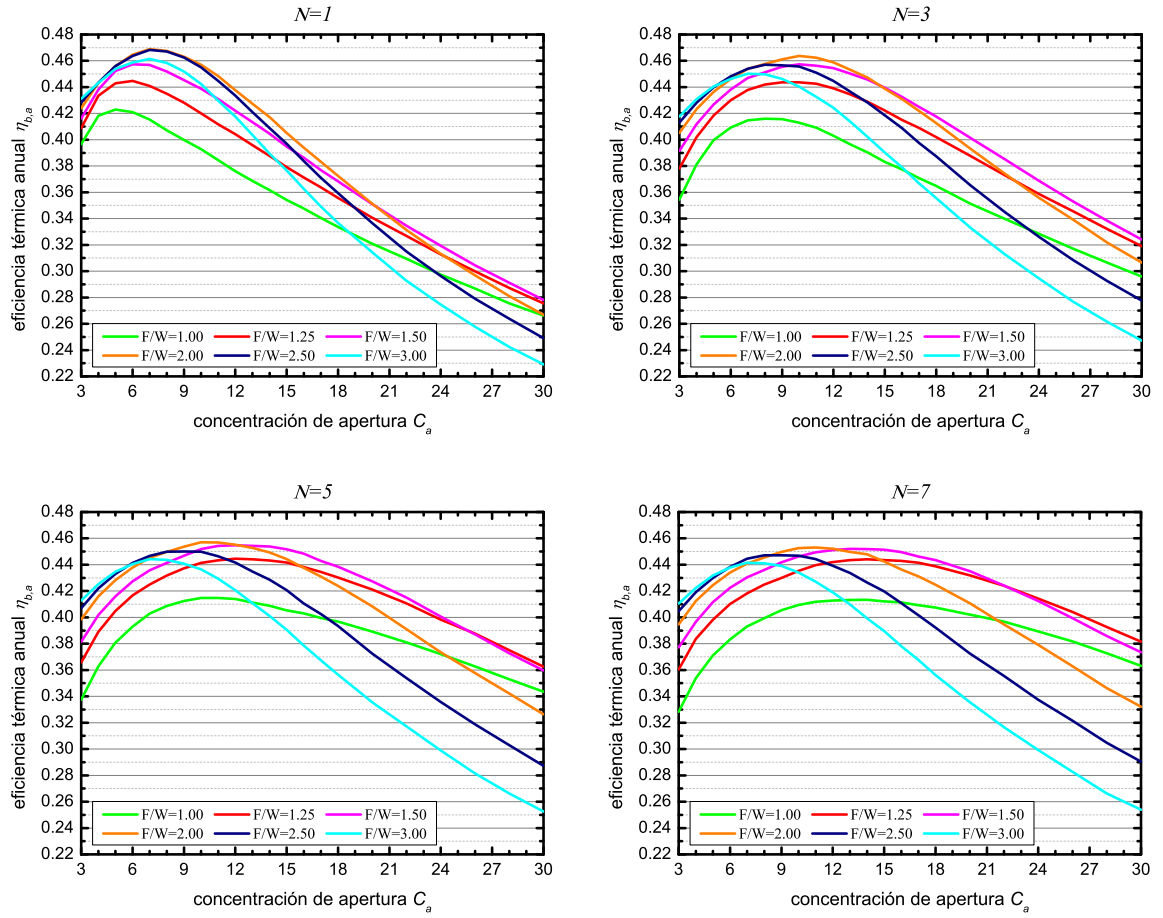


Figura 6.14: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Palma de Mallorca.

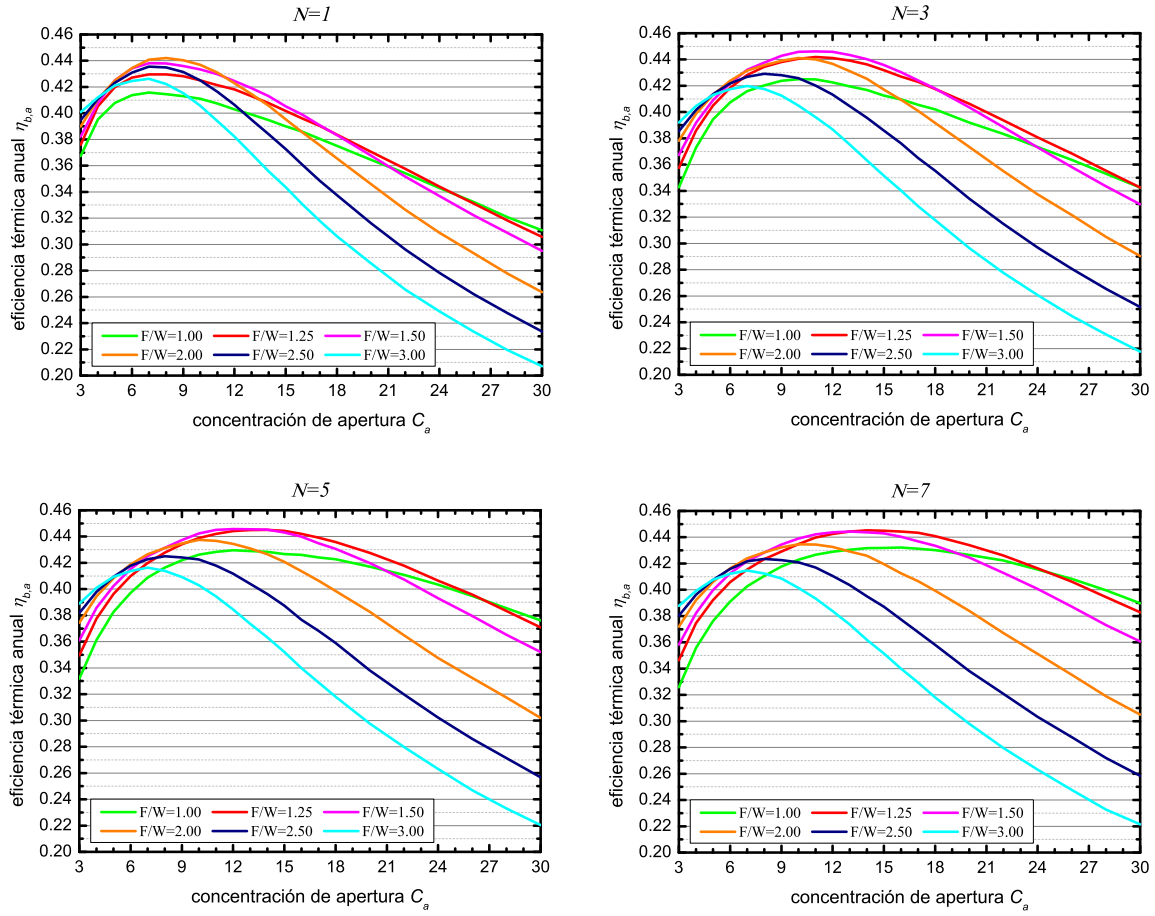


Figura 6.15: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Palma de Mallorca.

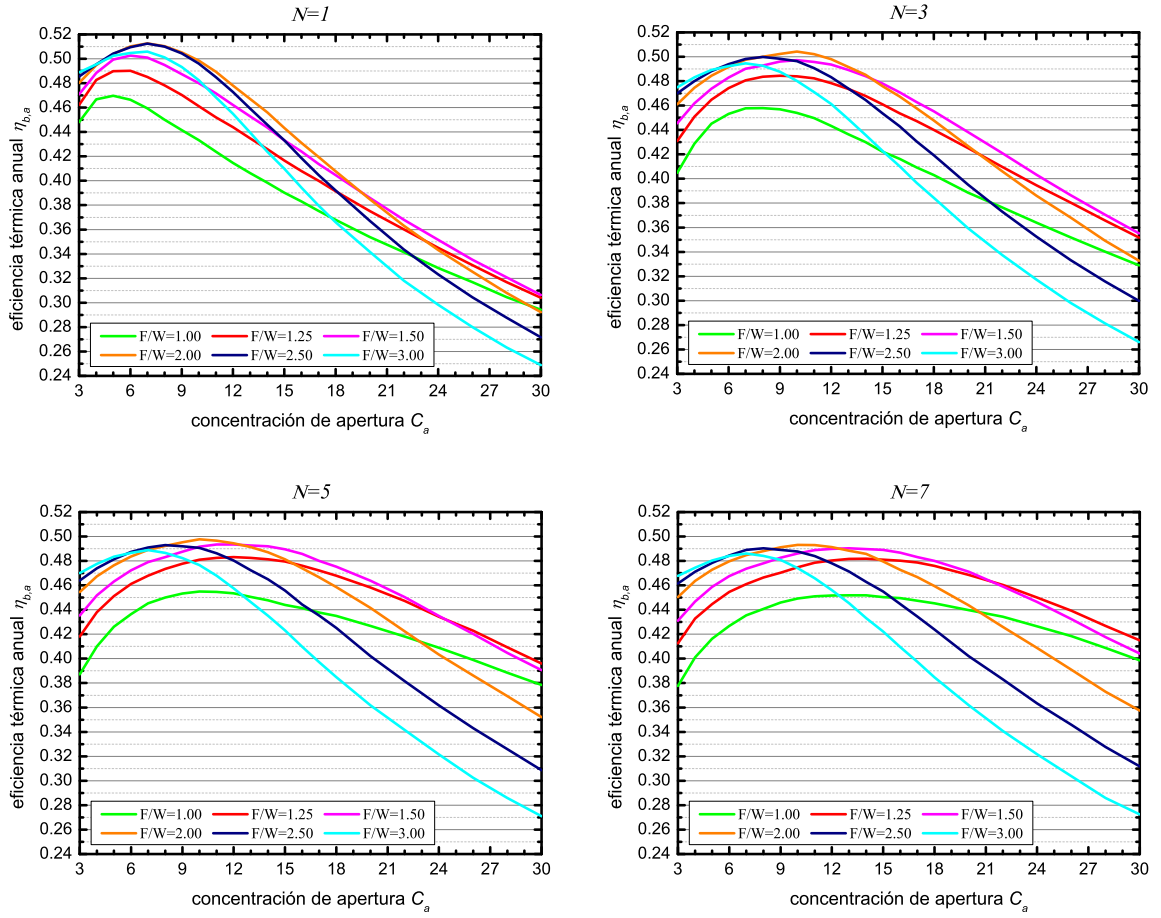


Figura 6.16: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de El Cairo.

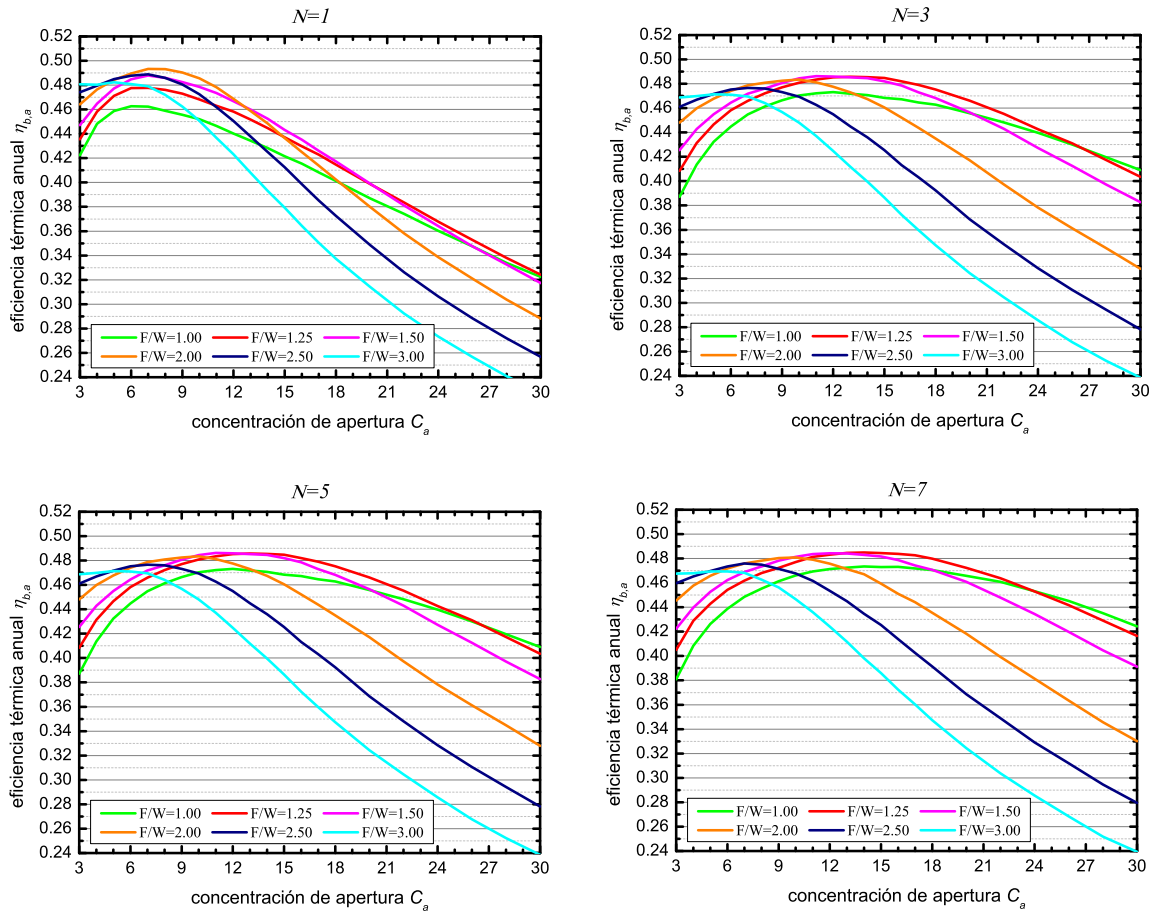


Figura 6.17: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC EO, $\gamma_c = -90^\circ$, e inclinación $\beta_c = 15^\circ$. Clima de El Cairo.

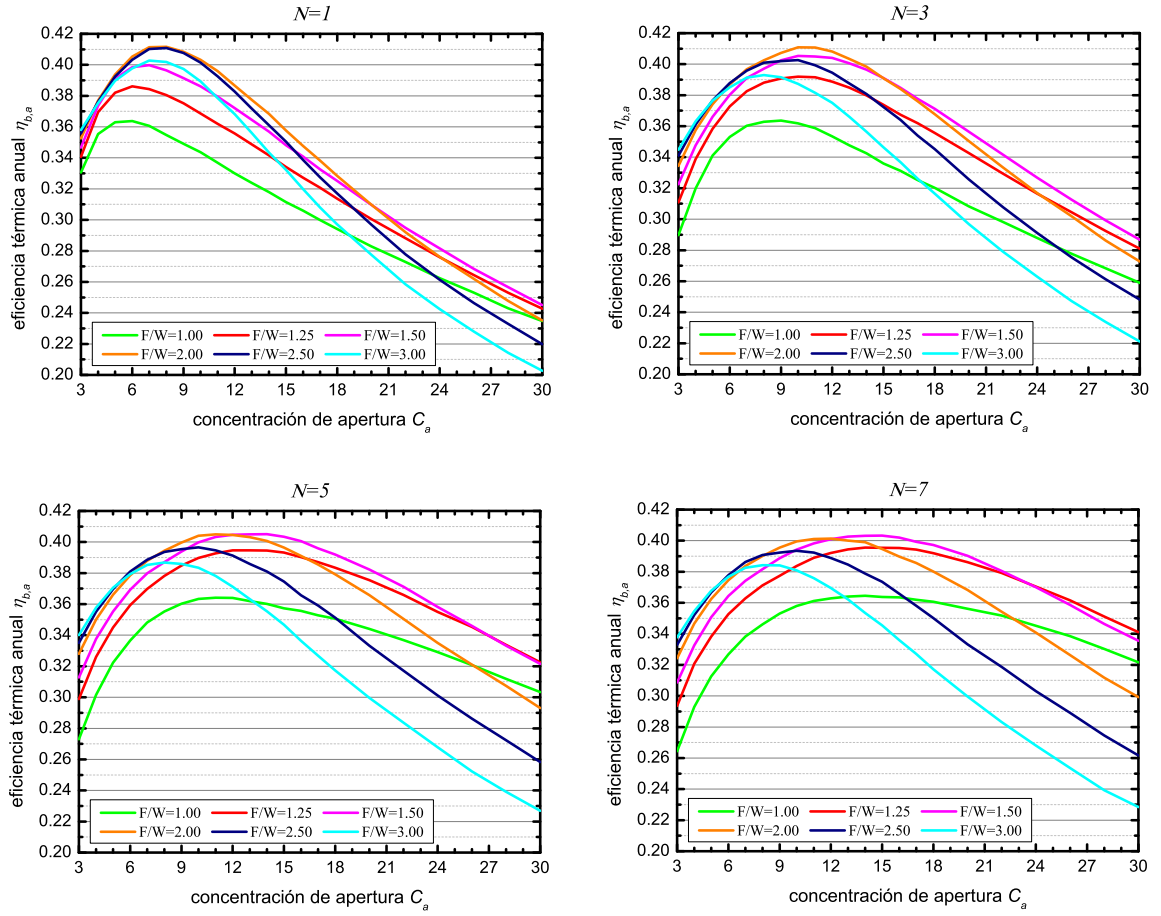


Figura 6.18: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC NS, $\gamma_c=0^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Múnich.

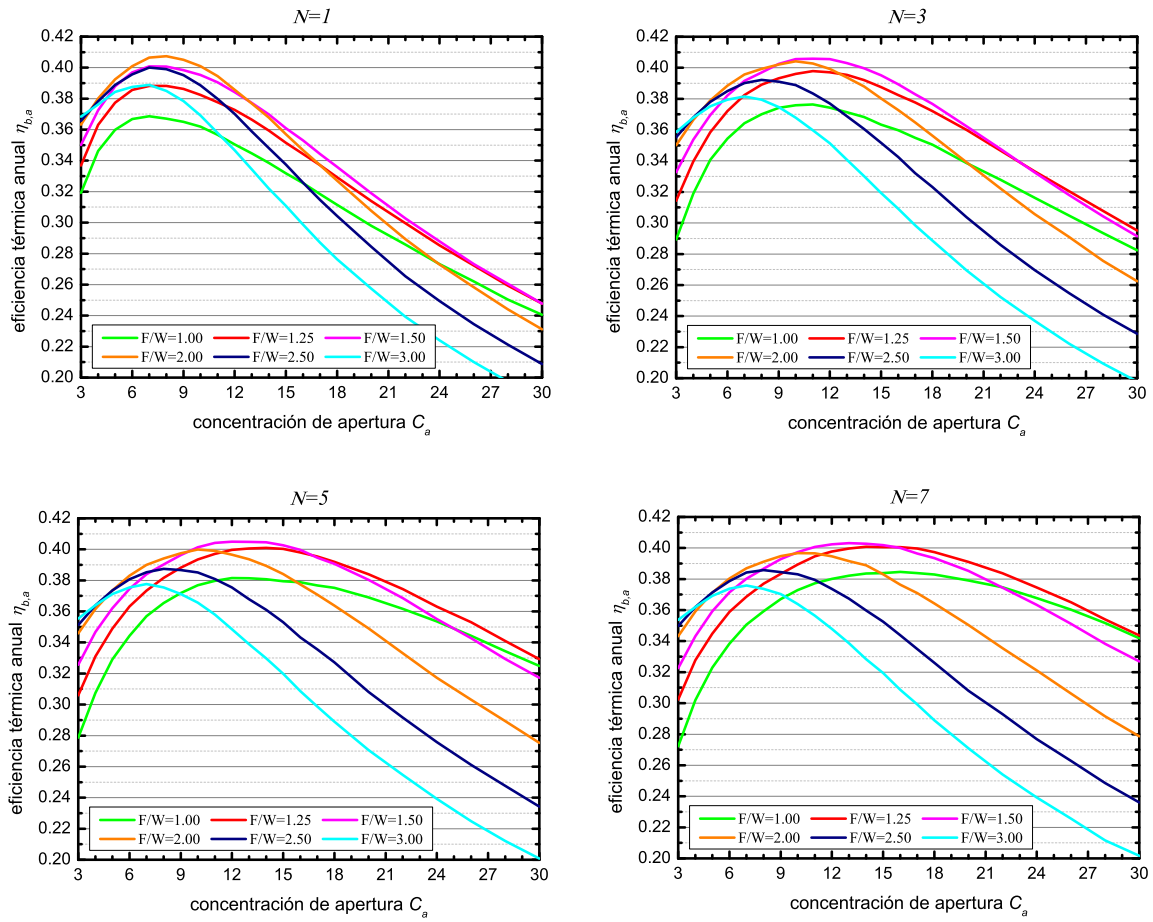


Figura 6.19: Eficiencia térmica anual respecto la radiación directa en el plano inclinado en función de la concentración de aperturas C_a para diferentes valores del ratio F/W . Orientación del CSFMSC EO, $\gamma_c=-90^\circ$, e inclinación $\beta_c=15^\circ$. Clima de Múnich.

F/W	C_a	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_a	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_a	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$
2	7	1	46.9	44.1	45.5	2.75	7	1	46.6	43.2	44.9	1.75	14	5	45.4	43.7	44.6
2	8	1	46.8	44.2	45.5	1.75	9	1	45.7	44.0	44.8	2.25	10	1	45.8	43.3	44.5
2.25	8	1	46.9	44.0	45.4	1.5	13	7	45.2	44.4	44.8	2.75	6	1	46.2	42.8	44.5
2.25	7	1	47.0	43.9	45.4	1.75	10	5	45.5	44.0	44.8	1.5	16	7	45.0	44.0	44.5
1.75	10	3	46.2	44.5	45.3	2	12	3	45.9	43.7	44.8	1.5	8	1	45.2	43.8	44.5
1.75	11	3	46.2	44.5	45.3	1.5	14	7	45.2	44.4	44.8	2	12	5	45.5	43.4	44.5
1.75	7	1	46.5	44.1	45.3	1.75	13	5	45.6	44.0	44.8	1.25	14	7	44.4	44.5	44.5
2	10	3	46.4	44.1	45.2	1.5	7	1	45.7	43.8	44.8	2.25	11	3	45.8	43.1	44.5
1.75	8	1	46.2	44.2	45.2	2.25	10	3	46.1	43.4	44.7	1.25	13	5	44.4	44.5	44.5
2.5	7	1	46.8	43.6	45.2	1.5	15	5	45.2	44.3	44.7	1.75	10	7	45.1	43.8	44.5
2	9	1	46.3	44.0	45.2	1.5	12	7	45.1	44.4	44.7	1.5	8	3	45.1	43.8	44.4
1.5	10	3	45.7	44.6	45.2	2.5	6	1	46.4	43.1	44.7	1.25	12	5	44.5	44.4	44.4
2	11	3	46.2	44.0	45.1	2	10	5	45.7	43.8	44.7	1.75	14	7	45.2	43.7	44.4
1.5	11	3	45.6	44.6	45.1	1.5	15	7	45.1	44.3	44.7	2	9	5	45.4	43.5	44.4
1.75	9	3	46.0	44.2	45.1	1.5	10	5	45.2	44.2	44.7	1.25	15	7	44.4	44.5	44.4
2.5	8	1	46.7	43.5	45.1	1.75	8	3	45.6	43.8	44.7	1.75	9	5	45.1	43.7	44.4
2.25	9	1	46.4	43.7	45.1	1.75	13	3	45.5	43.9	44.7	1.25	14	5	44.3	44.5	44.4
1.75	12	3	45.9	44.3	45.1	2.5	9	1	46.3	43.1	44.7	1.5	16	5	44.8	44.0	44.4
1.5	12	5	45.5	44.6	45.0	2	10	1	45.7	43.7	44.7	3	7	1	46.2	42.6	44.4
1.5	12	3	45.4	44.6	45.0	2.25	9	3	46.0	43.4	44.7	1.25	13	7	44.4	44.4	44.4
2	9	3	46.1	43.9	45.0	1.5	13	3	45.0	44.3	44.7	1.75	10	1	45.1	43.7	44.4
1.5	13	5	45.4	44.6	45.0	2	11	5	45.7	43.7	44.7	2	11	7	45.3	43.5	44.4
1.5	11	5	45.4	44.5	45.0	2	8	3	45.8	43.6	44.7	1.25	16	7	44.3	44.4	44.4
2	6	1	46.5	43.5	45.0	1.75	11	7	45.3	44.0	44.6	2	10	7	45.3	43.5	44.4
1.75	11	5	45.7	44.2	45.0	2.75	8	1	46.4	42.9	44.6	2.25	10	5	45.5	43.1	44.3
1.5	14	5	45.4	44.5	45.0	1.75	12	7	45.3	43.9	44.6	2.5	8	3	45.7	42.9	44.3
1.75	6	1	46.3	43.6	44.9	1.75	13	7	45.3	43.9	44.6	1.25	15	5	44.2	44.4	44.3
1.75	12	5	45.7	44.2	44.9	1.5	6	1	45.7	43.4	44.6	1.5	14	3	44.6	44.0	44.3
1.5	9	3	45.6	44.3	44.9	2.25	8	3	45.8	43.3	44.6	2	7	3	45.4	43.2	44.3
2.25	6	1	46.5	43.3	44.9	1.5	11	7	44.9	44.2	44.6	1.25	11	5	44.3	44.2	44.3

Tabla 6.2: Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 792 casos calculados. Clima de Palma de Mallorca. La eficiencia se expresa en %.

F/W	C_a	N	$\eta_{b,a}$	NS	$\eta_{b,a}$	EO	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_a	N	$\eta_{b,a}$	NS	$\eta_{b,a}$	EO	$\bar{\eta}_{b,a}$
2	7	1	51.3	49.3	50.3	49.3	49.3	1.5	10	3	49.7	48.9	48.9	48.9	48.9
2.25	7	1	51.4	49.2	50.3	49.2	49.3	3	6	1	50.5	48.1	48.1	48.2	48.9
2	8	1	51.0	49.3	50.2	49.3	49.3	2.5	9	1	50.5	48.1	48.1	47.7	48.8
2.25	8	1	51.2	49.1	50.1	49.1	49.3	2	8	3	50.0	48.5	48.5	48.5	48.8
2.5	7	1	51.3	48.9	50.1	48.9	49.2	3	7	1	50.6	47.9	47.9	48.5	48.8
1.75	7	1	50.9	49.2	50.0	49.2	49.2	2.25	8	3	50.1	48.4	48.4	48.4	48.8
2.25	6	1	51.0	49.0	50.0	49.0	49.2	3	5	1	50.3	48.2	48.2	48.0	48.8
2	6	1	51.0	49.0	50.0	49.0	49.2	1.75	5	1	50.3	48.2	48.2	48.3	48.8
2.5	6	1	51.0	48.8	49.9	48.8	49.2	2	10	1	49.9	48.6	48.6	47.8	48.8
1.75	8	1	50.5	49.2	49.9	49.2	49.2	1.5	11	3	49.6	48.8	48.8	48.1	48.8
1.75	6	1	50.8	48.9	49.9	48.9	49.2	2.25	9	3	50.1	48.2	48.2	48.0	48.7
2.5	8	1	51.0	48.6	49.8	48.6	49.1	1.75	8	3	49.8	48.5	48.5	48.0	48.7
2	9	1	50.5	49.0	49.8	49.0	49.1	2.25	10	3	50.2	48.1	48.1	48.2	48.7
2.75	7	1	51.1	48.5	49.8	48.5	49.1	1.75	12	3	49.8	48.5	48.5	47.6	48.7
2.25	9	1	50.6	48.7	49.7	48.7	49.1	1.5	9	3	49.6	48.6	48.6	48.2	48.7
2.75	6	1	50.8	48.5	49.6	48.5	49.1	2.25	7	3	49.8	48.3	48.3	48.4	48.7
2	10	3	50.4	48.7	49.6	48.7	49.1	1.75	11	5	49.7	48.5	48.5	48.0	48.7
1.75	10	3	50.2	48.9	49.6	48.9	49.1	2	7	3	49.8	48.4	48.4	48.1	48.7
2.5	5	1	50.4	48.5	49.5	48.5	49.1	2	10	5	49.8	48.4	48.4	47.8	48.7
1.5	7	1	50.1	48.8	49.4	48.8	49.1	1.5	12	3	49.4	48.7	48.7	48.4	48.7
1.75	11	3	50.1	48.8	49.4	48.8	49.0	1.5	8	1	49.5	48.6	48.6	47.6	48.7
2.25	5	1	50.4	48.5	49.4	48.5	49.0	2.25	10	1	49.9	48.1	48.1	48.0	48.7
2	9	3	50.2	48.6	49.4	48.6	49.0	1.75	10	5	49.6	48.5	48.5	47.9	48.7
2	5	1	50.4	48.4	49.4	48.4	49.0	2.5	8	3	50.0	48.0	48.0	48.1	48.7
1.75	9	3	50.1	48.7	49.4	48.7	49.0	1.5	11	5	49.3	48.6	48.6	47.9	48.7
1.75	9	1	49.9	48.9	49.4	48.9	49.0	1.5	12	5	49.3	48.6	48.6	48.5	48.7
1.5	6	1	50.3	48.5	49.4	48.5	49.0	1.75	12	5	49.6	48.3	48.3	48.2	48.7
2	11	3	50.2	48.5	49.3	48.5	48.9	2.5	7	3	49.8	48.1	48.1	48.1	48.7
2.75	8	1	50.6	48.0	49.3	48.0	48.9	2	12	3	49.8	48.0	48.0	47.2	48.7
2.75	5	1	50.3	48.3	49.3	48.3	48.9	1.5	13	5	49.3	48.5	48.5	48.1	48.7

Tabla 6.3: Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 792 casos calculados. Clima de El Cairo. La eficiencia se expresa en %.

F/W	C_a	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_a	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$	F/W	C_a	N	$\eta_{b,a}NS$	$\eta_{b,a}EO$	$\bar{\eta}_{b,a}$
2	8	1	41.2	40.7	41.0	1.75	13	3	40.5	40.1	40.3	2.25	11	3	40.6	39.4	40.0
2	7	1	41.1	40.7	40.9	1.5	15	5	40.3	40.3	40.3	1.5	16	5	40.1	40.0	40.0
2.25	8	1	41.3	40.4	40.9	1.5	13	7	40.3	40.3	40.3	2.75	8	1	40.7	39.3	40.0
1.75	11	3	41.0	40.7	40.9	1.5	14	7	40.3	40.3	40.3	2.5	6	1	40.3	39.6	40.0
1.75	10	3	41.0	40.7	40.8	1.75	6	1	40.4	40.2	40.3	1.5	11	7	39.8	40.1	40.0
2.25	7	1	41.2	40.4	40.8	2.25	10	3	40.8	39.8	40.3	2.25	8	3	40.2	39.7	39.9
2	10	3	41.1	40.4	40.8	1.5	15	7	40.3	40.2	40.3	1.75	10	1	39.7	40.1	39.9
1.75	7	1	40.8	40.6	40.7	1.5	9	3	40.3	40.3	40.3	1.75	10	7	39.9	39.9	39.9
1.75	8	1	40.7	40.7	40.7	1.75	10	5	40.3	40.2	40.3	1.75	15	5	40.2	39.6	39.9
2	9	1	40.8	40.5	40.7	2	10	1	40.3	40.1	40.2	2	11	7	40.1	39.7	39.9
2	11	3	41.1	40.3	40.7	1.75	14	5	40.5	39.9	40.2	2	9	5	40.0	39.8	39.9
1.75	12	3	40.8	40.4	40.6	2	10	5	40.4	40.0	40.2	1.5	8	1	39.6	40.1	39.9
1.75	9	3	40.7	40.4	40.6	2	11	5	40.5	39.9	40.2	2	13	3	40.3	39.4	39.9
1.5	10	3	40.5	40.6	40.5	2.75	7	1	40.8	39.6	40.2	2	13	5	40.3	39.4	39.8
1.5	11	3	40.5	40.6	40.5	2.25	6	1	40.5	39.9	40.2	1.75	14	3	40.0	39.6	39.8
2.25	9	1	40.9	40.1	40.5	1.5	13	3	40.1	40.3	40.2	1.75	9	5	39.8	39.9	39.8
2.5	7	1	41.0	40.0	40.5	1.75	13	7	40.4	40.0	40.2	1.25	14	7	39.6	40.1	39.8
1.75	12	5	40.7	40.3	40.5	1.75	12	7	40.3	40.1	40.2	2	10	7	40.0	39.7	39.8
2.5	8	1	41.1	39.9	40.5	1.5	12	7	40.1	40.2	40.2	1.5	14	3	39.6	40.0	39.8
1.5	12	5	40.5	40.5	40.5	2.5	9	1	40.8	39.5	40.1	1.25	15	7	39.5	40.1	39.8
1.5	14	5	40.5	40.5	40.5	2.25	9	3	40.5	39.7	40.1	1.75	15	7	40.1	39.5	39.8
1.5	13	5	40.5	40.5	40.5	1.75	11	7	40.2	40.1	40.1	2	12	7	40.1	39.5	39.8
1.5	12	3	40.4	40.6	40.5	1.5	16	7	40.2	40.0	40.1	1.25	16	7	39.5	40.1	39.8
2	9	3	40.7	40.2	40.5	1.75	8	3	40.2	40.0	40.1	2.25	10	5	40.2	39.4	39.8
1.75	11	5	40.6	40.4	40.5	2	8	3	40.3	39.9	40.1	1.5	17	7	39.9	39.6	39.8
2	12	3	40.8	39.9	40.4	1.75	14	7	40.3	39.8	40.1	1.5	6	1	39.9	39.7	39.8
1.5	11	5	40.3	40.4	40.4	2	12	5	40.5	39.7	40.1	1.25	14	5	39.5	40.1	39.8
1.75	13	5	40.6	40.1	40.4	1.5	10	5	40.0	40.1	40.1	1.25	13	5	39.5	40.1	39.8
1.75	9	1	40.2	40.5	40.4	1.5	7	1	40.0	40.1	40.0	1.25	12	5	39.5	40.0	39.7
2	6	1	40.5	40.1	40.3	2.25	10	1	40.4	39.6	40.0	1.5	8	3	39.7	39.7	39.7

Tabla 6.4: Valores que toman los parámetros de diseño y la eficiencia térmica anual para las orientaciones del concentrador NS y EO. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio de ambas $\bar{\eta}_{b,a}$. Se exponen los 90 casos más eficientes de un total de 792 casos calculados. Clima de Múnich. La eficiencia se expresa en %.

Con la finalidad de realizar una comparativa de la energía capturada por el CSFMSC en relación a la tecnología actual, en la Tabla 6.5 se expone la energía ganada por el CSFMSC para el diseño más eficiente de cada clima y orientación. Se comparan estos valores con el colector de tubos de vacío que se ha tomado como referencia, ver Tabla 5.9b). En el caso del colector de tubos de vacío se considera orientación NS por capturar más energía que en el caso EO en los climas analizados. Se puede observar que, en todos los climas y orientación, la energía ganada por el CSFMSC para una temperatura de trabajo de 200°C es superior al colector tomado como referencia, llegando a alcanzar hasta un 25 % en el caso de Múnich y de Palma de Mallorca, y un 20 % en el caso de El Cairo. Se ha considerado inclinación $\beta_c=15^\circ$ para el captador de tubos de vacío.

a)	Clima y orientación	Energía anual por unidad de superficie CSFMSC
	El Cairo NS	711 kWh/m ²
	El Cairo EO	683 kWh/m ²
	Palma de Mallorca NS	521 kWh/m ²
	Palma de Mallorca EO	490 kWh/m ²
	Múnich NS	240 kWh/m ²
	Múnich EO	237 kWh/m ²

Tabla 6.5: Energía ganada por unidad de superficie para una temperatura de trabajo $T_{av}=200^\circ\text{C}$. En todos los casos $\beta_c = 15^\circ$, y caso más eficiente del CSFMSC para cada clima.

Al igual que en el Capítulo 5 Sección 5.4, a continuación, y con el objetivo de encontrar diseños óptimos para cualquier orientación y clima, se exponen los valores promedios de la eficiencia térmica anual $\bar{\eta}$ para los tres climas y las dos orientaciones consideradas. Los diseños más eficientes en promedio están caracterizados por valores en el rango $F/W=1.5-2.75$ y valores en el rango de $C_a=6-14$; correspondiendo a los casos de uno, tres y cinco espejos parabólicos.

En la Tabla 6.6 se exponen los 42 diseños que presentan más interés, que pertenecen a aquellos diseños que maximizan la energía capturada promediada $\bar{\eta}$ minimizando el ratio F/W , y maximizando la concentración de aperturas con la finalidad de minimizar el tamaño del receptor. El diseño más eficiente en promedio de todos los casos analizados, para cualquier orientación y clima, pertenece al diseño de un espejo parabólico y valores de $F/W=2.0$ y $C_a=7$. Desde el punto de vista constructivo, diseños con un espejo parabólico, valores bajos de F/W , y valores altos de C_a son interesantes por simplicidad de diseño constructivo a la hora de fabricar un concentrador solar. Los valores marcados en negrita en la Tabla 6.6 corresponden a esta premisa por no distanciarse demasiado de la máxima eficiencia en promedio.

F/W	C_a	N	$\bar{\eta}$	F/W	C_a	N	$\bar{\eta}$	F/W	C_a	N	$\bar{\eta}$
2	7	1	45.6	1.5	8	1	44.5	1.25	18	5	43.1
2	8	1	45.5	1.5	16	7	44.3	1.25	20	7	43.1
1.75	7	1	45.3	1.5	16	5	44.2	1.25	9	1	42.7
1.75	10	3	45.2	1.5	14	3	44.1	1.25	15	3	42.5
1.75	8	1	45.2	1.5	9	1	44.0	1.25	22	7	42.3
1.75	11	3	45.2	1.25	17	7	44.0	1.25	20	5	42.2
1.5	11	3	44.9	1.25	16	5	43.8	1.25	10	1	42.1
1.75	9	1	44.9	1.25	18	7	43.7	1.25	16	3	41.9
1.5	12	3	44.8	1.5	15	3	43.6	1	6	1	41.6
1.5	13	5	44.8	1.5	10	1	43.5	1	7	1	41.4
1.5	14	5	44.8	1.25	6	1	43.5	1	8	1	40.9
1.5	7	1	44.7	1.25	17	5	43.5	1	22	7	40.7
1.5	15	5	44.5	1.25	7	1	43.4	1	9	1	40.4
1.5	13	3	44.5	1.25	8	1	43.1	1	20	5	40.0

Tabla 6.6: Valores que toman los parámetros de diseño y los valores promedio de la eficiencia térmica anual para las orientaciones NS y EO, y los tres climas considerados. Los diseños están ordenados por mayor eficiencia promedio $\bar{\eta}$. Se exponen los 42 casos que presentan mayor interés desde el punto de vista eficiente y de diseño. La eficiencia se expresa en %.

6.7. Conclusiones

Se ha realizado un análisis paramétrico mediante *ray-tracing* del CSFMSC para valores de $F/W=1-3$, para el número de espejos $N=1, 3, 5$ y 7 y para concentración de apertura $C_a=1-30$. Se ha considerado una calidad óptica de los espejos caracterizada por $\sigma_B=8$ mrad. También se ha considerado el tamaño angular del Sol con $CSR=0.05$.

La máxima eficiencia óptica en incidencia normal se alcanza para el mínimo valor de la concentración considerado $C_a=3$ con un valor del 82 %. La eficiencia óptica en incidencia normal disminuye a medida que C_a aumenta. Esta disminución en función de C_a es fuertemente dependiente con el ratio F/W , a medida que F/W aumenta la disminución es menos pronunciada.

Se han obtenido las curvas IAM transversal y longitudinal. Se ha visto que cada parámetro de diseño afecta de manera diferente. Valores grandes de F/W afectan positivamente en el IAM transversal, mientras que lo hacen de manera negativa en el IAM longitudinal. En cambio a medida que aumenta la concentración afecta negativamente en ambos casos del IAM, aunque la tendencia se invierte en el IAM transversal para ángulos de incidencia mayores a 30° cuando F/W y N toman valores grandes. En cuanto al parámetro N no se aprecia un mismo patrón para el efecto que produce en el IAM transversal, en cambio en el IAM longitudinal

las curvas son muy similares independientemente de los otros dos parámetros de diseño, y se observa que sus efectos son casi despreciables.

Se ha demostrado que la factorización simple del IAM subestima la energía óptica capturada por el receptor. Se ha introducido un término analítico en la factorización que permite una predicción más exacta que en el caso simple. Aún así esta aproximación causa errores elevados para ángulos transversal y longitudinal elevados.

Se ha analizado la densidad de radiación en el receptor para cuatro casos de diseño. Se ha visto que el pico máximo es independiente del número de espejos N . Pueden alcanzarse valores pico de 25 soles cuando $F/W=1.50$. El caso de un espejo parabólico muestra que parte de la energía no es interceptada por el receptor, por consiguiente es posible encontrar una posición diferente del receptor para cada ángulo de incidencia con la finalidad de optimizar la energía capturada. Aún así con un diseño formado por un espejo parabólico, al no disponer de escalones, se puede capturar más energía que en los otros casos con $N=3$, 5 y 7.

Se ha analizado el comportamiento térmico del CSFMSC para tres climas diferentes a una temperatura de trabajo de 200°C. Independientemente del clima, los diseños óptimos vienen dados por valores de $F/W=2.00$ -2.5 para orientación NS y $F/W=1.50$ -2.50 para orientación EO. Existe un valor óptimo de la concentración C_a para cada valor par de valores de F/W y N . El valor $F/W=1.0$ presenta poco interés.

Se pueden obtener valores de hasta un 51.4 % para la eficiencia térmica anual en climas de alta radiación directa (El Cairo). En climas de baja radiación directa se pueden obtener valores del 41.2 %. Los diseños más eficientes independientemente del clima y de la orientación están caracterizados por $N=1$, $F/W=2.0$ y $C_a=7$ -8.

Desde el punto de vista de diseño, dos casos presentan mucho interés, ya que tan solo tienen una disminución del 3.5 % y 6.4 % relativo a la máxima eficiencia promediada y por tener valores bajos en F/W , un reducido tamaño del receptor, y un sólo espejo. Respectivamente estos dos diseños son:

- $F/W=1.50$, $N=1$, $C_a=9$
- $F/W=1.25$, $N=1$, $C_a=9$

Se ha visto que los rangos escogidos para los valores que toman cada uno de los parámetros de diseño han sido los adecuados, ya que han permitido conocer el comportamiento tanto óptico como térmico del CSFMSC, y al mismo tiempo haber encontrado diseños que optimizan la energía capturada para aplicaciones en el rango de media temperatura.

Para finalizar, la energía capturada por el CSFMSC a 200°C es entre un 20 y 25 % superior al colector de tubos de vacío tomado como referencia dependiendo de la localidad considerada.

Capítulo 7

Ensayos experimentales de dos prototipos

En este Capítulo se exponen los resultados experimentales de dos prototipos. El primer prototipo que se expone es un FMSC con valores de diseño $N=9$, $F/W=1.50$ y $\gamma=0.94$. El segundo prototipo es un CSFMSC con un espejo parabólico $N=1$, $F/W=1.50$ y $C_a=11.5$. A partir de los ensayos llevados a cabo con el primer prototipo se obtiene la eficiencia óptica experimental en condiciones reales y se compara con el correspondiente valor obtenido por el programa *ray-tracing*, se aprecia un buen ajuste en la comparación. El segundo prototipo es ensayado con el procedimiento de la norma europea EN-12975-2:2006 (AENOR, 2007), y se obtiene un buen ajuste para la curva de eficiencia térmica. Como consecuencia de este segundo trabajo experimental, se propone un procedimiento para la obtención de la curva característica para concentradores de media temperatura de geometría variable. La buena similitud entre valores experimentales y teóricos representan una validación del programa *ray-tracing* desarrollado.

7.1. Ensayos experimentales de un prototipo FMSC: CCS-taR V0

En el verano de 2006 se construyó un prototipo FMSC con $N=9$ espejos planos, $F/W=1.5$ y $\gamma=0.94$. La construcción fue llevada a cabo por la *Universitat de les Illes Balears* en colaboración con la empresa Tecnología Solar Concentradora, SL (www.tsc-concentra.com). Al prototipo se le llamó CCStaR V0 (*Concentrating Collector with Stationary Reflector Versión 0*). El objetivo principal de la construcción de este prototipo fue experimentar con un modelo real y poder ganar experiencia en el ámbito del diseño y de la experimentación, así como poder comparar resultados experimentales con el modelo teórico de *ray-tracing*. Los ensayos fueron proyectados para ensayar el concentrador a temperatura ambiente, y poder así validar el modelo teórico de *ray-tracing*.

7.1.1. Descripción del prototipo CCStaR V0

Si bien la descripción en detalle del diseño mecánico cae fuera del propósito de la Tesis Doctoral, a continuación se describen los aspectos más relevantes del CCStaR V0. El receptor fue construido de manera artesanal a partir de los componentes de un captador plano comercial. El receptor construido es un captador plano de 12 cm de amplitud de absorbedor y longitud neta de 2.7 m, con cubierta de vidrio de 2 mm de espesor, y aislado con 40 mm de espuma de poliuretano en las caras restantes. La cubierta fue montada con chapa de acero galvanizado. Ver Figura 7.1.



Figura 7.1: Receptor construido para el prototipo CCStaR V0

En cuanto al reflector, fue construido con una base de espuma de poliestireno expandido cortada por control numérico en la cual se adhirieron los nueve espejos planos, ver Figura 7.2 para una visualización del reflector una vez fabricado en fase laboratorio. Los espejos de 2 mm de espesor de vidrio, tienen una reflectividad total en su primera superficie de $\rho_{2\pi}=0.95$ y un coeficiente de extinción de $k = 8 \text{ m}^{-1}$ para el vidrio (valores suministrados por el fabricante). El mecanismo de control se describe en Alorda et al. (2006). El prototipo fue cofinanciado por una ayuda propia de la *Universitat de les Illes Balears*. En la Figura 7.3 se muestra una imagen durante el proceso de construcción y otra imagen del prototipo ya finalizado e instalado.

El factor de intercepción $\gamma=0.94$ se ha determinado mediante *ray-tracing* asumiendo un valor de $\sigma_B=10$ mrad para la dispersión angular de los espejos. Los detalles se muestran en la Sección 7.1.5.



Figura 7.2: Reflector construido para el CCStaR V0

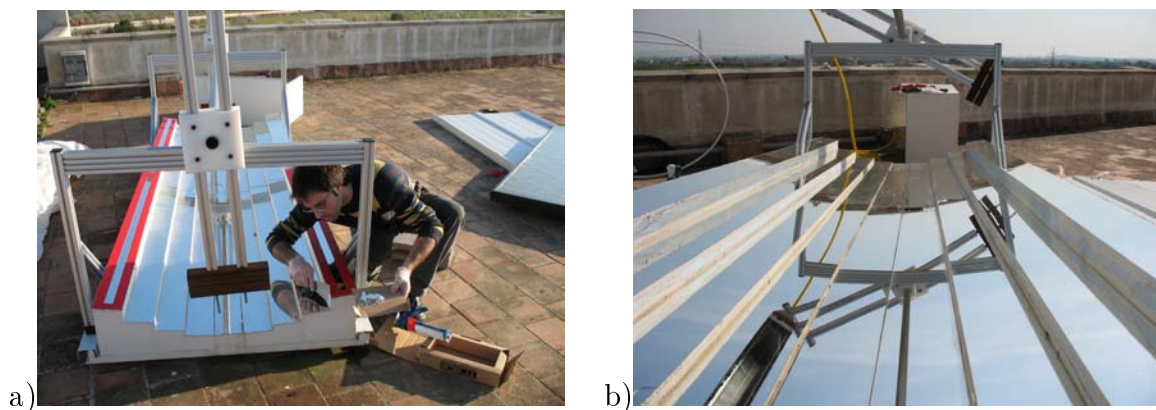


Figura 7.3: a) Imagen durante el proceso de construcción. b) Imagen del prototipo CCStaR V0 ya instalado

7.1.2. Banco de ensayos y equipos de medida

Se construyó un banco de ensayos para determinar experimentalmente la eficiencia térmica del CCStaR V0 a temperatura ambiente. El banco de ensayos está basado en el circuito de bucle cerrado propuesto en la norma EN-12975-2:2006. Está constituido por un conjunto de equipos de medida y actuadores integrados en un circuito hidráulico, un equipo de captación de medidas, y elementos medidores de las condiciones climáticas. En la Figura 7.4 se expone el esquema hidráulico y dispositivos de medida.

El banco de ensayos permite mantener una temperatura de entrada al colector estable, para ello se pone en funcionamiento una enfriadora que disipa el calor y así enfriar el circuito hidráulico. La sección AC del circuito hidráulico funciona a modo de colector de frío para este efecto de disipación. La sección DB es un *bypass* para calentar el circuito hidráulico, ya que no se dispone de un calentador para este propósito, se utiliza entonces la propia fuente

de calor del concentrador solar. La sección CF se utiliza para regular el caudal de entrada en el colector a modo *bypass* estrangulando la válvula 2V motorizada antes del caudalímetro. Las mediciones del piranómetro, pirheliómetro, temperaturas de entrada, salida y ambiente, y velocidad del viento son registradas por una tarjeta de adquisición de datos. Los valores son almacenados cada cinco segundos.

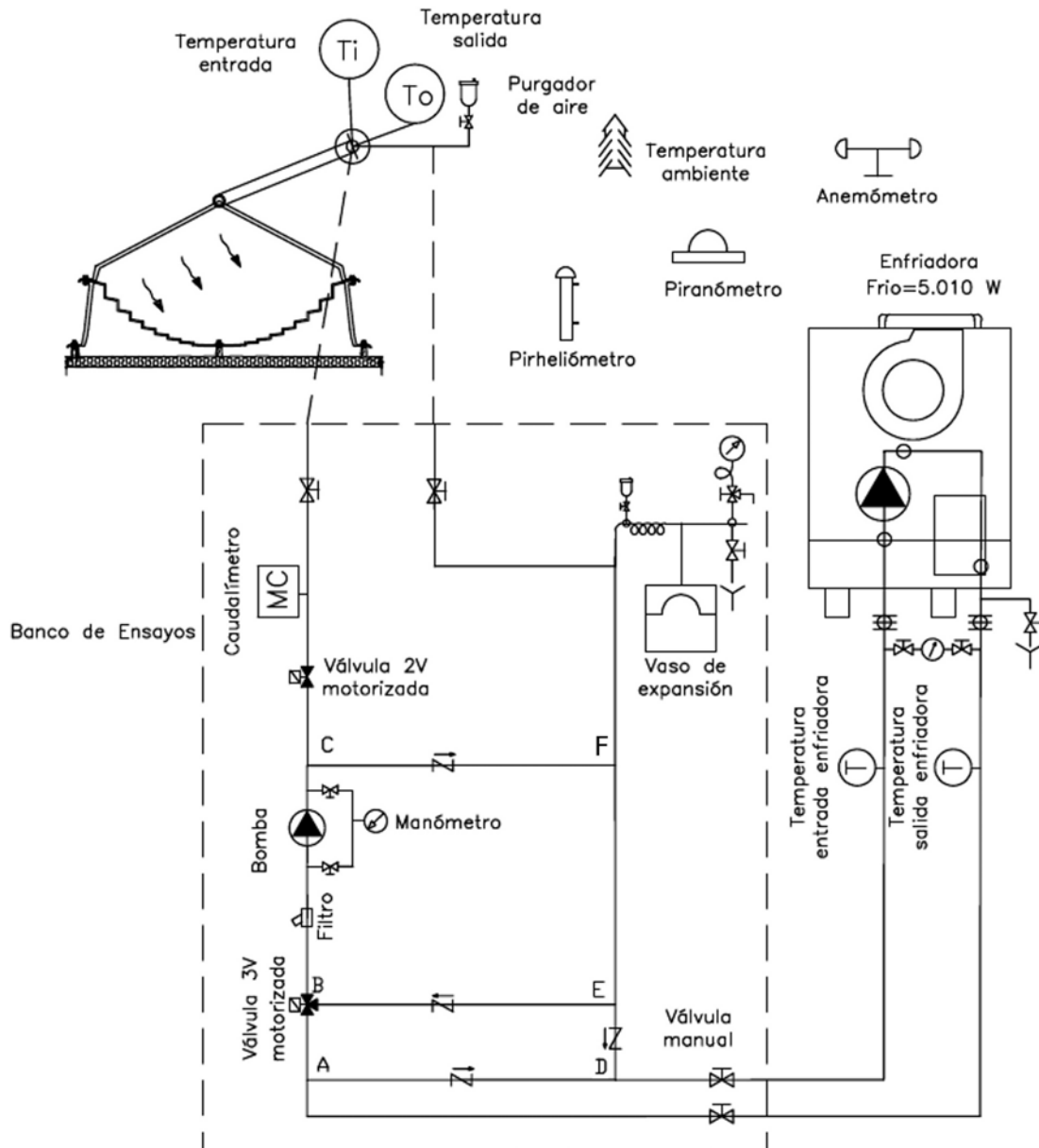


Figura 7.4: Esquema de principio para el ensayo del CCStaR V0

En la Figura 7.5 se muestra una imagen del banco de ensayos cuando fue construido en fase laboratorio. El primer ensayo que se realizó en fase laboratorio fue medir la potencia captada por el fluido (agua) que era disipada por una resistencia eléctrica. Este valor de potencia captada debe coincidir con el valor de la potencia disipada eléctricamente. Esta primera experiencia es esencial para confirmar que los termistores y el caudalímetro funcionan correctamente. Se obtuvo una potencia térmica de 1318 ± 52 W cuando la potencia disipada por la resistencia eléctrica medida con una pinza amperimétrica fue de 1371 ± 1 W. Se concluye que la medida realizada a través del fluido es ligeramente inferior debido al comportamiento no adiabático de la fuente calefactora, aún así se pudo experimentar con el banco de ensayos en el laboratorio para su posterior ubicación en el exterior. En la Figura 7.6 se muestra una imagen de captura de pantalla durante el proceso de medidas experimentales.



Figura 7.5: Banco de Ensayos construido en fase laboratorio

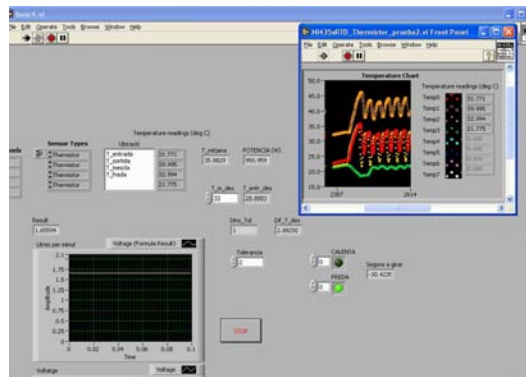


Figura 7.6: Captura de pantalla durante el proceso de medidas experimentales en fase laboratorio

una turbina Pelton con velocidad de rotación proporcional a la velocidad del fluido. Con este equipo se mide el caudal con una precisión de $\pm 1,0\%$ en la escala, esto es $\pm 0,02$ litros/minuto. El error en medidas sucesivas es de $\pm 0,004$ litros/minuto. La norma europea exige un error del $1,0\%$ del valor medido en caudal másico. Así pues la imprecisión en la medida del caudal es ligeramente superior a la recomendada.

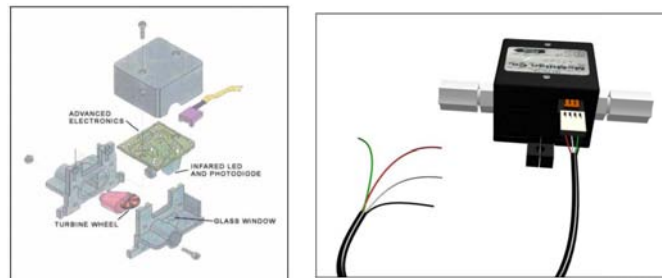


Figura 7.8: Caudalímetro McMillan modelo 107 *FLO SENSORS*® utilizado en el banco de ensayos para CCStaR V0

Actuadores de válvulas, regulación de temperatura y caudal

Dos actuadores, uno para la válvula de tres vías y otro por una válvula de dos vías, sirven para regular la temperatura del fluido a la entrada del captador y el caudal respectivamente. Estos actuadores cierran o abren los diferentes caminos por donde circula el fluido. Los actuadores instalados son los siguientes:

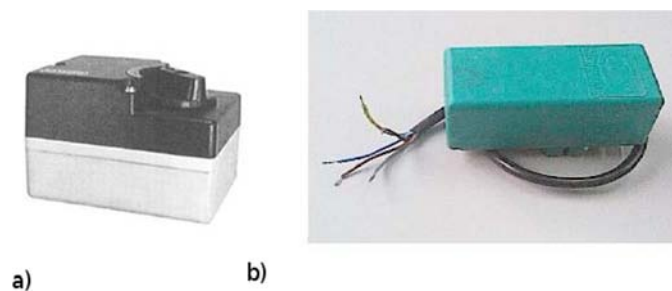


Figura 7.9: a) Actuador válvula 3-vías *SIEMENS*® HVAC SQK34.00 b) Actuador válvula 2-vías *CIDIEMME*® E COMPACT RS

Medidores de la radiación solar global y solar directa: radiómetro y pirheliómetro

La medida de la radiación global y directa en dirección normal al Sol se realizó mediante un radiómetro modelo CM11 y un pirheliómetro modelo CH1 respectivamente de la marca *Kipp & Zonen*. A continuación se muestran estos aparatos de medida y sus especificaciones.

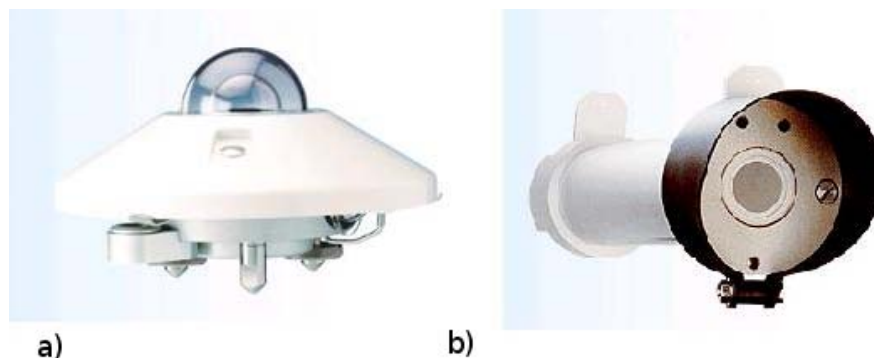


Figura 7.10: a) Piranómetro CM11 K&Z. b) Pirheliómetro CH1 K&Z

Tiempo de respuesta (95 %)	12 s
No estabilidad (cambio/año)	$\pm 0.5 \%$
No linealidad (0-1000) $[W/m^2]$	$\pm 0.6 \%$
Sensibilidad en temperatura	$\pm 1 \%$
Sensibilidad $[\mu V/W/m^2]$	4 - 6
Rango espectral (50 % puntos)	305 - 2800 nm
Precisión diaria esperada	$\pm 3 \%$

Tabla 7.1: Especificaciones CM11

Tiempo de respuesta (95 %)	7 s
No linealidad (0-1000) $[W/m^2]$	$\pm 0.2 \%$
Sensibilidad en temperatura	$\pm 1 \%$
Sensibilidad $[\mu V/W/m^2]$	11
Rango espectral (50 % puntos)	200 - 4000 nm
Ángulo de apertura	5°

Tabla 7.2: Especificaciones CH1

Anemómetro

Se dispuso de un anemómetro IQ-v3.1 para proporcionar una medida precisa de la velocidad del viento. El equipo está fabricado en aluminio anódico y preparado para una exposición continuada en condiciones externas.

Figura 7.11: Anemómetro modelo IQ-v3.1 de la empresa *Quimisur SL*

Rango de medida	0 - 60 m/s
Precisión (a 16bits)	± 0.002 m/s
Sensibilidad	0.9982 m/pulso
Salida	contacto libre de tensión

Tabla 7.3: Especificaciones anemómetro IQ-v3.1

Tarjetas de adquisición de datos

Se han utilizado dos tarjetas de adquisición de datos. La primera se trata de la tarjeta 4350NI de *National Instruments*® que permite medir de forma muy precisa la resistencia de los termistores y por tanto conocer la temperatura. La otra tarjeta, NIDAQPad-6015, también de la misma marca comercial, se utiliza para la captación de señales analógicas y para activar o desactivar los componentes actuadores del banco de ensayo (válvulas actuadoras), señales digitales.

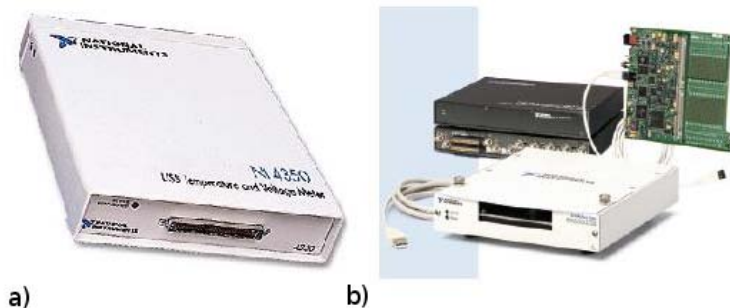


Figura 7.12: a) Tarjeta 4350NI para la lectura de termistores. b) Tarjeta NIDAQPad-6015 para adquisición y actuadores

Sensor de temperatura del ambiente

Se dispuso una sonda de temperatura Väisälä para medir de forma precisa la temperatura del ambiente. Se ubicó en el interior de una cavidad protectora ventilada.

Ubicación del Banco de Ensayos en el exterior

Una vez realizadas las pruebas en laboratorio se procedió a ubicar el banco de ensayos en el exterior. El banco se instaló en un armario preparado para la intemperie. A continuación se describe la distribución de componentes en el armario, empezando por la parte superior: cuadro eléctrico y fuentes de alimentación, un PC industrial, tarjetas de adquisición y control, teclado, y circuito hidráulico. Ver la Figura 7.13. El pirheliómetro se acopló a un telescopio con seguimiento solar, se comprobó que realizaba el seguimiento solar correctamente con los visores del mismo. Los aparatos de viento y la sonda de temperatura ambiente se instalaron en un mástil. Ver Figura 7.14.



Figura 7.13: Equipos de medida. Banco de ensayos en el exterior

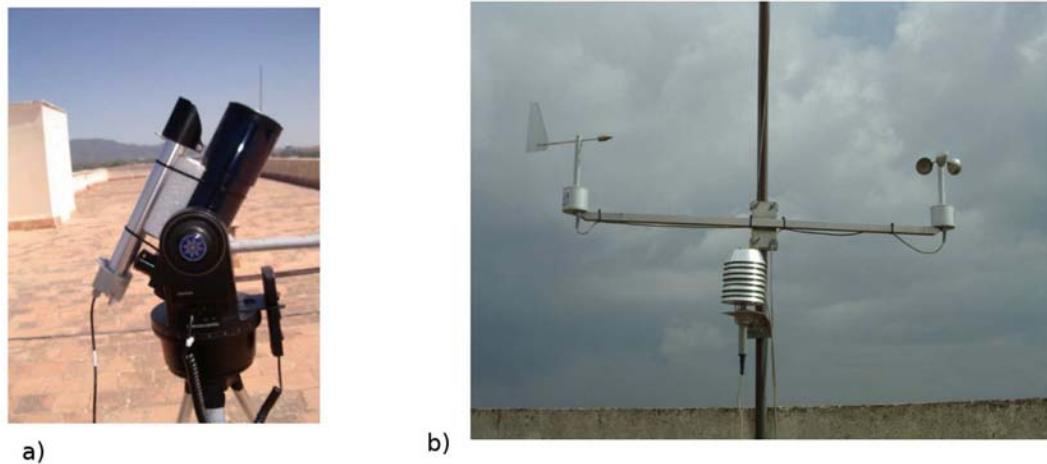


Figura 7.14: a) Pirheliómetro acoplado a un telescopio para el seguimiento solar. b) Medidores de viento y temperatura ambiente

7.1.3. Eficiencia óptica del receptor

El receptor es un colector de placa plana elaborado en el laboratorio a partir de un colector de placa plana comercial. En este apartado se muestra el procedimiento para determinar la eficiencia óptica del receptor. Este valor es necesario para conocer el comportamiento óptico del sistema completo concentrador-receptor. Por otro lado, se comparará con el resultado teórico calculado mediante *ray-tracing* para determinar el factor de transferencia de calor F_{av} del receptor. En la Figura 7.15 se muestra una imagen durante el ensayo experimental.



Figura 7.15: Ensayo del receptor a temperatura ambiente

La energía capturada por el receptor, determinada experimentalmente, se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{exp} = C_p \delta \dot{V} (T_o - T_i) \quad (7.2)$$

donde C_p es la capacidad térmica del agua, δ es la densidad del agua, \dot{V} es el caudal volumétrico, T_i y T_o es la temperatura del agua en la entrada y en la salida del colector respectivamente. Los valores de C_p y de δ dependen de la temperatura.

Durante el verano del 2006 se realizaron ensayos con la finalidad de determinar la eficiencia óptica del receptor en incidencia normal, estabilizando la temperatura de entrada de tal manera que la temperatura de trabajo T_{av} se mantuviera a una temperatura ± 4 K respecto a la temperatura ambiente. En la Figura 7.16 se muestran las gráficas con los datos registrados.

Se puede observar que la temperatura de entrada está dentro del intervalo que corresponde a ± 1 K respecto a la temperatura media de trabajo. En todos los casos para determinar la eficiencia, se han considerado los últimos 60 segundos de la secuencia para realizar valores promedio, y la secuencia anterior se considera período de preacondicionamiento. Por otro lado, la norma exige una precisión mucho mayor en condiciones estacionarias, ± 0.1 K para la temperatura de entrada T_i con un período de preacondicionamiento de al menos 15 minutos y tiempo de medida estable de 10 minutos. Por consiguiente en nuestro caso no se pudo obtener este nivel de estabilidad, ahora bien, dado que la superficie neta del captador es tan sólo de 0.3235 m^2 , hace que los tiempos de preacondicionamiento y de medida obtenidos puedan ser suficientes debido a la baja inercia del receptor. En cualquier caso esta hipótesis será contrastada con los resultados finales obtenidos.

Las medidas se realizaron en horas cercanas al medio día solar, se pudo considerar incidencia normal, y la radiación difusa fue inferior al 12 % en todos los casos.

En la Figura 7.17 se muestra la eficiencia óptica determinada a partir de los datos experimentales. Según las medidas realizadas, la eficiencia óptica experimental del receptor es del $\eta_0 = 79.6 \pm 4.4 \%$. Se observa que en los ensayos #1, #3, y #4 la eficiencia es inferior al ensayo #2. Esto puede ser debido por dos motivos, el primero es que la tendencia en la temperatura de trabajo T_{av} de los tres primeros es positiva, lo que produce un efecto de menor energía capturada dado que medidas simultáneas no pertenecen a la misma porción de fluido; y el segundo motivo es que la temperatura de trabajo T_{av} en el ensayo #2 se encuentra muy próxima a la temperatura ambiente, en cambio en los ensayos #1, #3, y #4 el receptor se encuentra a una temperatura $\approx 4^\circ\text{C}$ por encima de la temperatura ambiente, lo que puede provocar ligeras pérdidas térmicas. En cualquier caso se observa que los valores obtenidos caen dentro de los márgenes del error experimental.

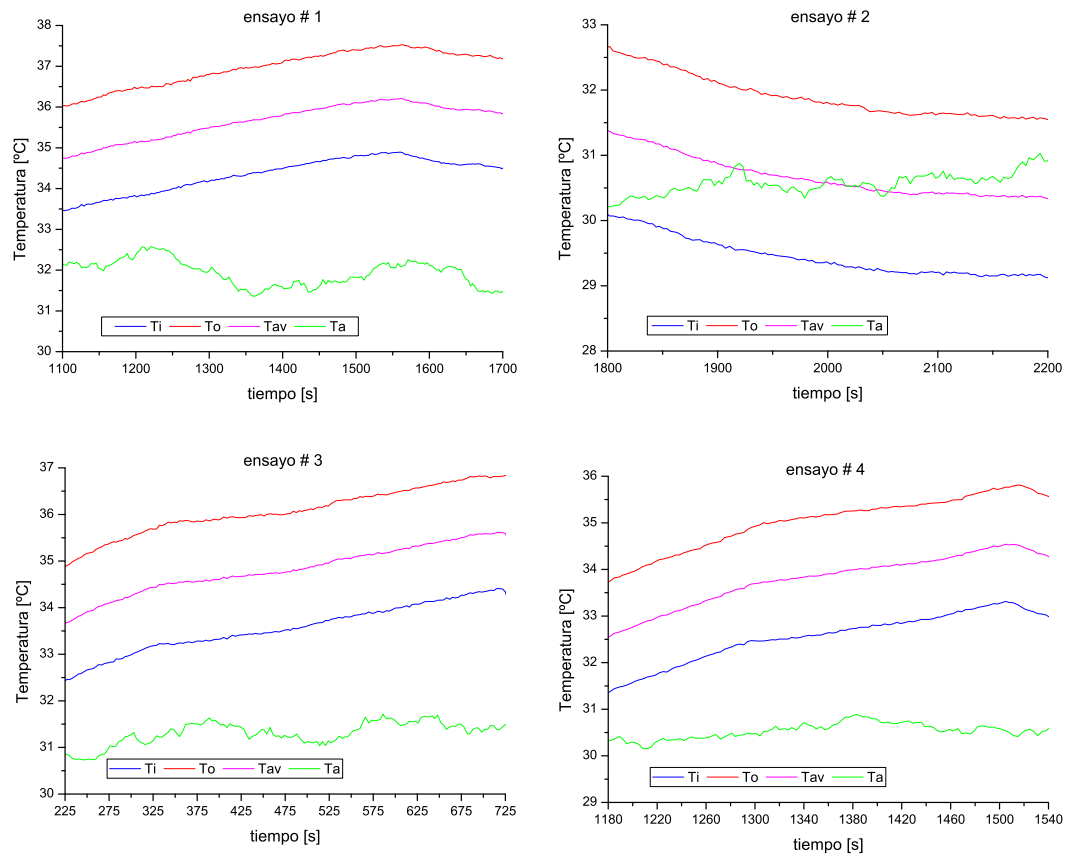


Figura 7.16: Temperaturas medidas durante el ensayo a temperatura ambiente del receptor

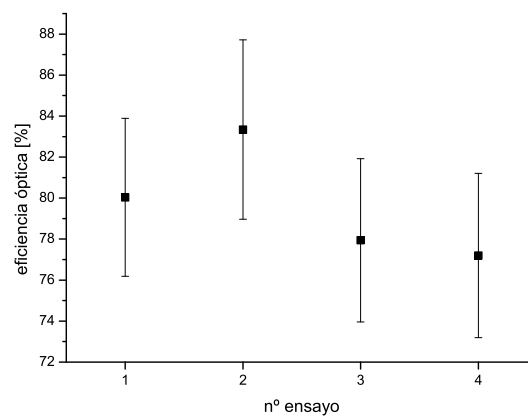


Figura 7.17: Eficiencia óptica medida durante los ensayos

Por otro lado, se ha introducido la geometría y las propiedades ópticas de los materiales que forman el receptor en el programa de *ray-tracing*, ver Figura 7.18. Se ha obtenido una eficiencia del 83.0 % asumiendo un coeficiente de extinción $k = 8 \text{ m}^{-1}$ para el vidrio, coeficiente de refracción del vidrio $n=1.56$, y la dependencia angular en la absorptividad caracterizada por los coeficientes $\alpha_0=0.91$, $b=0.057$ y $c=1.2$ (Tsfamichael and Wäckelgård, 2000) Ecuación (2.28).

Dado que en el programa de *ray-tracing* no se tiene en cuenta el coeficiente de transferencia de calor F_{av} , y comparando los dos valores obtenidos, implica que el coeficiente de transferencia de calor es $F_{av} = \frac{0.796}{0.830} = 0.96$. Este valor cae dentro de los márgenes considerados por estudios realizados en captadores de placa plana similares al construido (Duffie and Beckman, 1991). Se ha considerado el valor $F_{av}=0.96$ en los sucesivos cálculos.

Si bien es cierto que el modelo de *ray-tracing* no tiene en cuenta la componente difusa de la radiación, al tratarse de una medida experimental con alta radiación directa, se consideró la aproximación $(\tau\alpha)_{av} \simeq (\tau\alpha)_b$ (Duffie and Beckman, 1991).

Así pues se dispone de un modelo teórico para determinar el comportamiento óptico del receptor mediante *ray-tracing*.

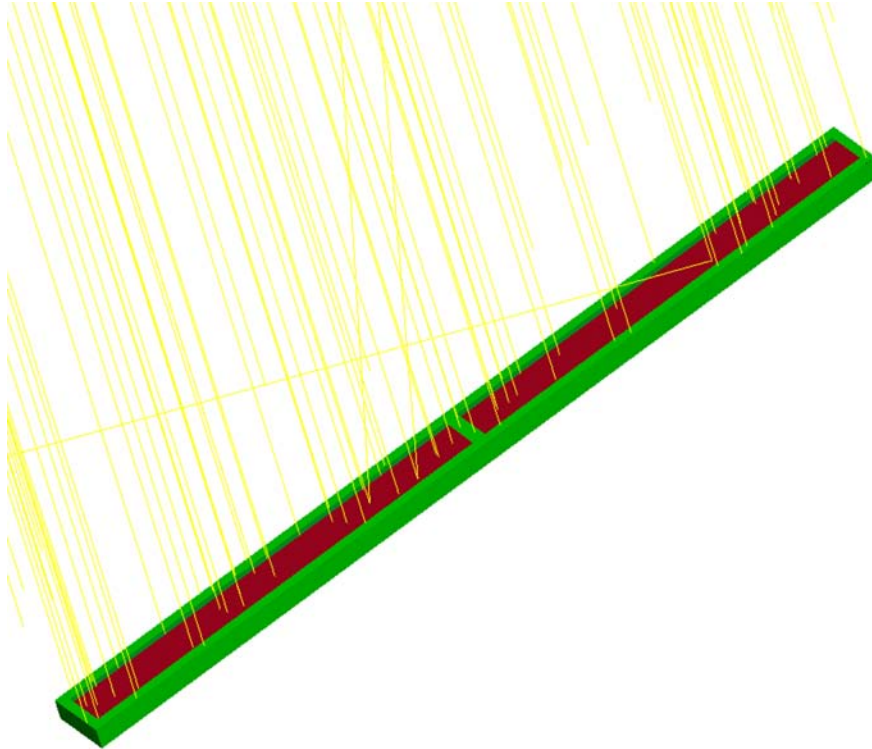


Figura 7.18: Visualización del *ray-tracing* en el receptor para el cálculo de la eficiencia óptica en incidencia normal

7.1.4. Determinación experimental del comportamiento óptico del CCStaR V0

Una vez que se determinó la eficiencia óptica del receptor y se dispuso del modelo teórico del mismo, se procedió a medir la eficiencia óptica del conjunto completo: reflector-receptor. Este ensayo se llevó a cabo el día 8/9/2006. El concentrador solar se instaló en la terraza superior del Edificio *Mateu Orfila* del campus universitario de la *Universitat de les Illes Balears*. En la Tabla 7.4 se muestran los valores que determinan la ubicación y orientación. A continuación se muestra una imagen durante el proceso de ensayos y dos capturas de pantalla durante la campaña experimental. El mismo día en que se realizó el ensayo experimental, se procedió a realizar una limpieza en profundidad tanto de los espejos como del receptor. Se supone que no hay pérdidas como efecto de suciedad.

Latitud	39.6° N
Longitud	2.65° E
α_c	0°
β_c	15°
γ_c	0°

Tabla 7.4: Ubicación y orientación del CCStaR V0. Orientación Sur e inclinación de 15°



Figura 7.19: CCStaR V0 funcionando en condiciones reales

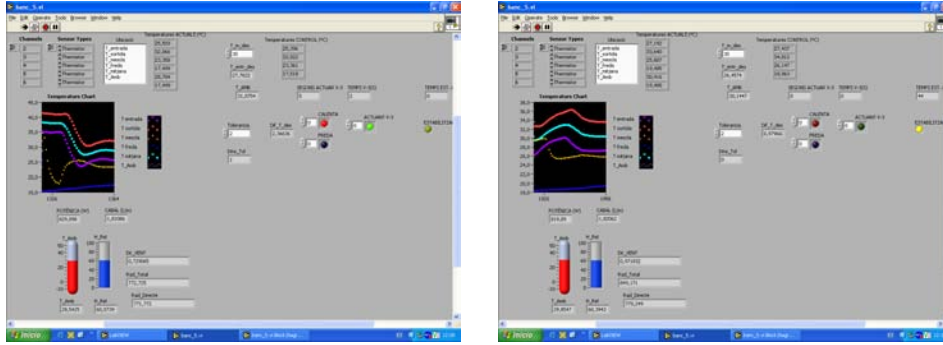


Figura 7.20: Capturas de pantalla en el proceso de registro de datos y actuación

El método considerado para caracterizar el comportamiento térmico es el propuesto por la norma Europea EN-12975-2:2006 en condiciones cuasidinámicas, ver la Ecuación 2.49. En el caso de un concentrador solar se puede simplificar la expresión despreciando el término de radiación difusa (ya que no es concentrada por los espejos), y el término de radiación de onda larga por tratarse de un receptor con cubierta de vidrio. El término de la velocidad del viento tampoco se tendrá en cuenta (es un término opcional según la norma). Así pues la potencia ganada por unidad de superficie de apertura (reflectora) en condiciones cuasidinámicas viene dada por la Ecuación 7.3:

$$\frac{\dot{Q}_g}{A_a} = \eta_0 K_b (\theta_t, \theta_l) G_{Tb} - c_1 (T_{av} - T_a) - c_2 (T_{av} - T_a)^2 - c_5 \frac{dT_{av}}{dt} \quad (7.3)$$

Cuando se realizan medidas experimentales con la temperatura media del fluido caloportador próxima a la temperatura ambiente, $T_{av} \simeq T_a$, y las medidas se han realizado de tal manera que se pueda despreciar el término capacitivo $\frac{dT_{av}}{dt} \simeq 0$, se puede determinar el factor $\eta_0 K_b (\theta_t, \theta_l)$ de manera experimental y comparar con el valor obtenido mediante *ray-tracing* para la misma posición que estaba el Sol al realizar la medida.

Se midieron las condiciones climáticas y el comportamiento térmico del concentrador en condiciones reales de funcionamiento estabilizando la temperatura de entrada a una temperatura de ± 4 K respecto a la temperatura ambiente. Por otro lado, se calculó la eficiencia óptica del concentrador mediante *ray-tracing* para la misma secuencia de valores de posicionamiento del Sol, utilizando el algoritmo de la PSA (Blanco et al., 2001), y teniendo en cuenta los valores experimentales para la radiación directa. Con este procedimiento se determinó mediante cálculo la potencia teórica que en cada momento el prototipo CCStaR V0 debía estar proporcionando en condiciones reales de funcionamiento a una temperatura de trabajo próxima a la temperatura ambiente.

En la Figura 7.21 se muestra la potencia determinada experimentalmente y la potencia teórica calculada mediante simulación. Tan sólo fue posible obtener nueve puntos con la estabilidad necesaria en la temperatura de entrada del concentrador para poder obtener la eficiencia

óptica. Se tuvo en cuenta un tiempo de preacondicionamiento tal cómo se hizo en la Sección 7.1.3. Se puede observar la buena coincidencia de los valores obtenidos experimentalmente con los valores obtenidos teóricos mediante simulación. En la Figura 7.22 se muestra una visualización del *ray-tracing* del concentrador CCStaR V0.

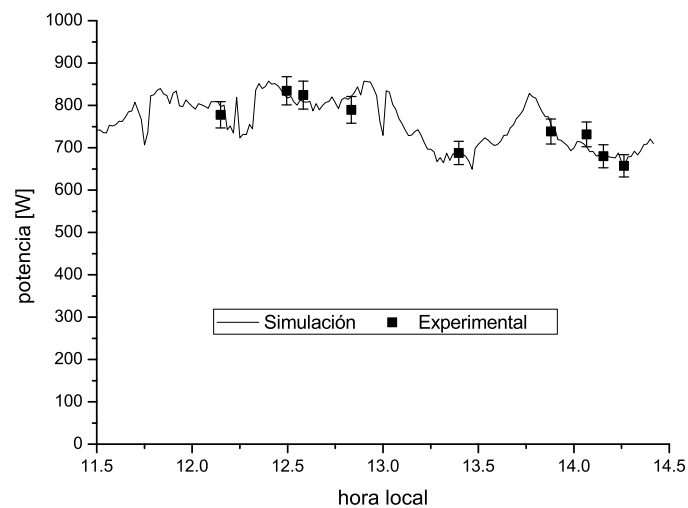


Figura 7.21: Potencia teórica mediante simulación y potencia experimental del prototipo CCStaR V0 en condiciones reales de funcionamiento a temperatura ambiente

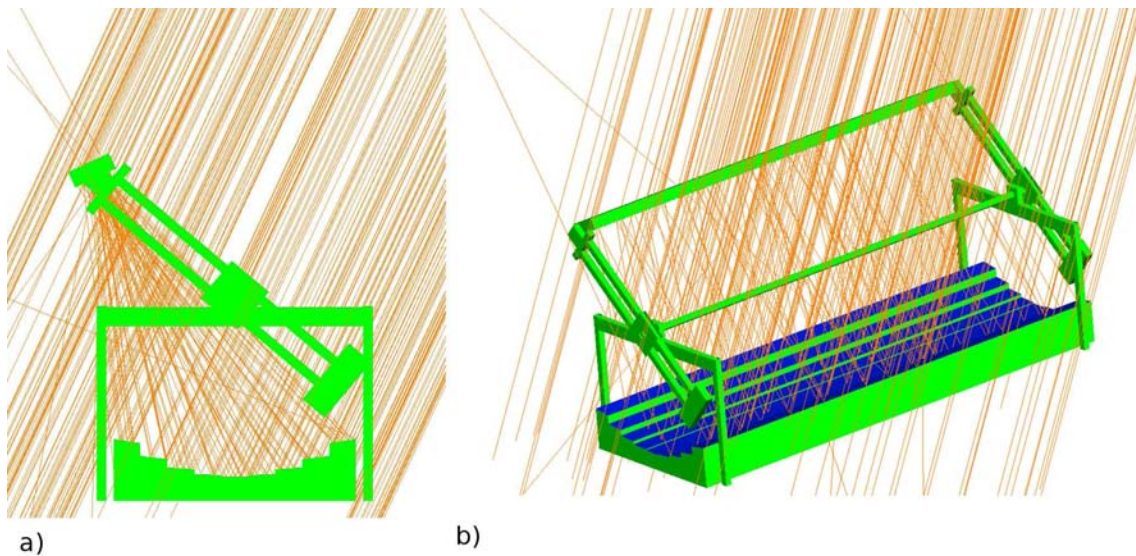


Figura 7.22: Visualización gráfica del *ray-tracing* para el prototipo CCStaR V0. a): Vista frontal. b): Vista general

7.1.5. Comportamiento óptico del CCStaR V0 mediante *ray-tracing*

Una vez validado el modelo teórico del CCStaR V0, en esta Sección se analiza el comportamiento óptico del prototipo mediante *ray-tracing*. En primer lugar se exponen algunas de las dimensiones del mismo, ver Tabla 7.5. Se puede observar que el tamaño longitudinal del receptor es inferior al tamaño longitudinal del reflector, lo que implica que en incidencia normal una parte de la energía reflejada no interceptará en el receptor por efectos de contorno. Este efecto sumado al efecto de sombras por el propio receptor se ha determinado mediante *ray-tracing*. El resultado es el límite superior que puede tomar la eficiencia óptica en un caso ideal. Se ha denominado a este factor como factor ζ . El valor obtenido es $\zeta=0.7293$.

Por otro lado, tal y como se ha definido el factor de intercepción γ , que corresponde a la fracción de energía solar incidente al reflector que es interceptada por la apertura del receptor, el cálculo de γ se realiza teniendo en cuenta tan sólo el tamaño angular del Sol y la dispersión angular del sistema σ_B . Se asume un caso ideal para $\rho_{2\pi}$, α , y τ igual a uno, y no se tienen en cuenta los elementos de sombra ni de contorno (factor ζ definido anteriormente).

Así pues, para obtener el valor de γ del CCStaR V0, se ha considerando una dispersión angular de los espejos caracterizada por $\sigma_B=10$ mrad y tamaño angular del Sol caracterizado por CSR=0.05. Entonces el valor obtenido mediante *ray-tracing* ha sido 0.6854, lo que implica un valor de $\gamma = 0.94$ al hacer el cociente $\frac{0.6854}{0.7293}$.

Finalmente se ha obtenido la eficiencia óptica del sistema completo teniendo en cuenta el factor de transferencia de calor $F_{av}= 0.96$, las propiedades de los materiales del receptor, y de los espejos. Se ha obtenido un valor de la eficiencia óptica en incidencia normal de $\eta_0=0.455$.

Longitud reflector	3 m
Amplitud reflector	1 m
Longitud neta receptor	2.7 m
Amplitud neta receptor	0.12 m

Tabla 7.5: Dimensiones del prototipo CCStaR V0

Se han calculado las curva IAM transversal K_t , y longitudinal K_l del prototipo CCStaR V0. En la Figura 7.23 se exponen los resultados de la eficiencia óptica transversal y longitudinal, esto es $\eta_0 \times K_t$ y $\eta_0 \times K_l$ respectivamente. En las gráficas se compara con el diseño considerado en el Capítulo 5, a este diseño se le ha llamado *diseño teórico*, que corresponde a los valores de $N=9$, $F/W=1.50$, y $\gamma=0.94$. En el *diseño teórico* también se ha considerado un factor $F_{av}= 0.96$.

Se puede observar que la eficiencia óptica transversal del CCStaR V0 es bastante inferior a la curva del *diseño teórico*. Esto es debido por varios motivos, el primero es que la dispersión

angular de los espejos es algo mayor, $\sigma_B=10$ mrad frente a $\sigma_B=8$ mrad, y por otro lado el prototipo presenta un eje en el mecanismo de seguimiento para la correcta posición del receptor que intercepta parte de la energía reflejada en ángulos de incidencia próximos a la normal. También el uso de materiales estándar, como ahora los espejos y el vidrio de la cubierta solar, no optimizados para la fabricación de concentradores solares hace que la eficiencia alcanzada no sea superior. Así como el efecto de sombras y de intercepción de $\zeta=73\%$ mencionado anteriormente.

En cuanto a la eficiencia óptica longitudinal, también se observa una disminución respecto al *diseño teórico*, esta disminución es debida a que la longitud del prototipo es tan sólo de tres metros frente a los diez metros considerados en el *diseño teórico*, por consiguiente aumentan considerablemente las pérdidas por efecto de borde.

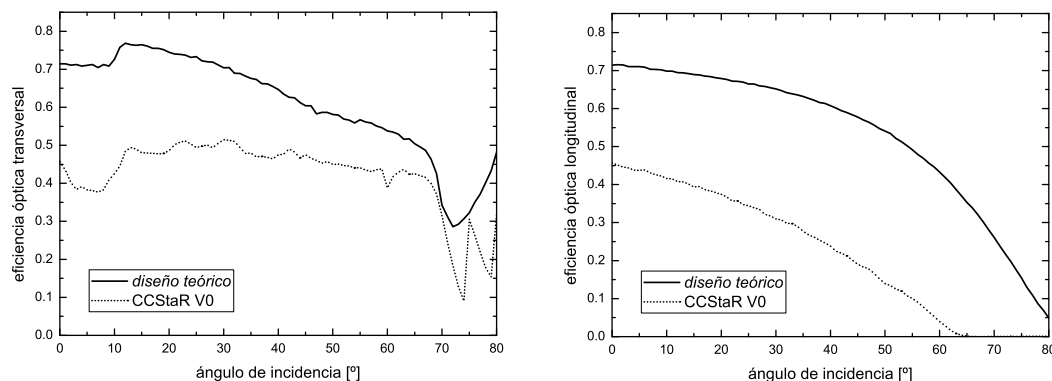


Figura 7.23: Eficiencia óptica transversal y longitudinal del prototipo CCStaR V0 y del *diseño teórico* con valores $N=9$, $F/W=1.50$, y $\gamma=0.94$

En la Figura 7.24 se muestran las curvas IAM del CCStaR V0. Se observa una buena eficiencia en la componente transversal, mientras que se observa bajo rendimiento en la componente longitudinal.

Para finalizar, se ha calculado la distribución de radiación en el receptor con el programa de *ray-tracing*. Se han emitido un millón de rayos en estos experimentos numéricos y se ha discretizado el receptor en 100 segmentos transversales. En la Figura 7.25 se muestran los resultados para tres ángulos de incidencia transversal. Se puede observar que se alcanza una concentración de radiación máxima próxima a los seis soles. A diferencia de los resultados expuestos en el Capítulo 5, ver Figura 5.13, la radiación máxima se produce en un ángulo distinto al ángulo de incidencia normal. Esto es debido a que el prototipo CCStaR V0 presenta sombras por el propio receptor en las posiciones próximas a incidencia normal, en cambio no existen sombras en el *diseño teórico* debido a que el receptor escogido fue un tubo

evacuado que capturaba energía por ambas caras, ver Figura 5.3. En la Figura 7.25 se muestra la eficiencia óptica que alcanza el prototipo para cada ángulo de incidencia transversal considerado.

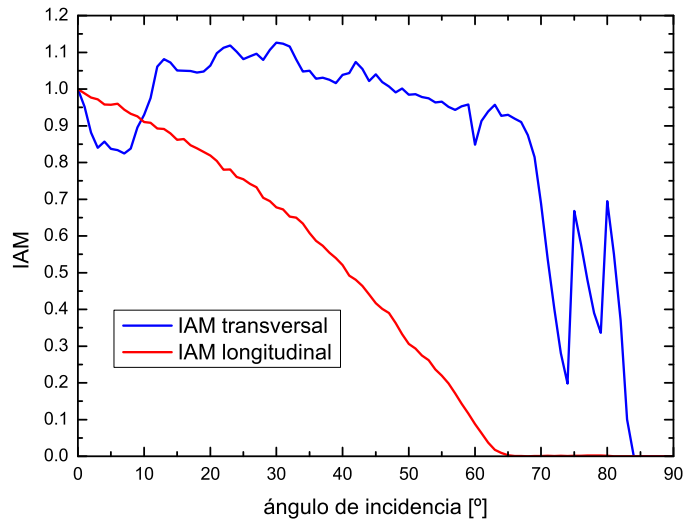


Figura 7.24: Curvas IAM del prototipo CCStaR V0

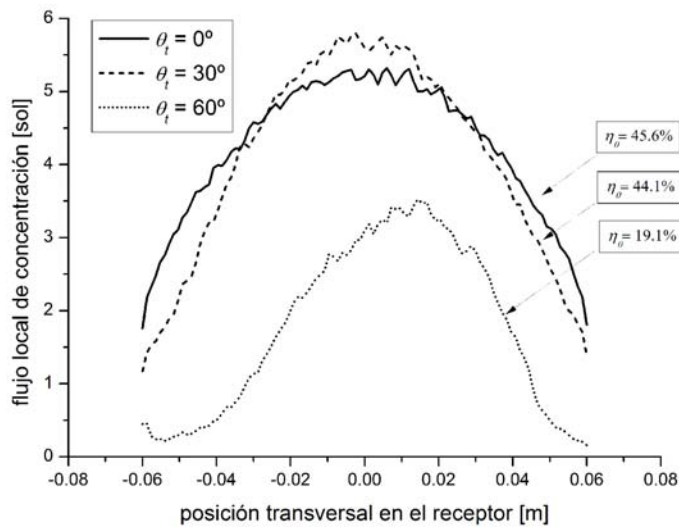


Figura 7.25: Distribución local de la densidad de radiación en el receptor del prototipo CCStaR V0

7.2. Ensayos experimentales de un prototipo CSFMSC: CCStaR V1

La empresa Tecnología Solar Concentradora, SL (www.tsc-concentra.com) y la *Universitat de les Illes Balears* han desarrollado conjuntamente un concentrador solar con reflector estacionario y foco móvil, el prototipo se ha llamado CCStaR V1. Este diseño ha sido fruto de la experiencia ganada con el prototipo CCStaR V0, y los estudios teóricos que se presentan en la Tesis Doctoral. La geometría está basada en el concepto CSFMSC, con $N=1$ espejo parabólico, $F/W=1.50$ y $C_a=11.5$. En esta Sección se describe el concentrador solar y se exponen los resultados experimentales llevados a cabo: análisis de la calidad geométrica, curvas IAM, y curva de eficiencia térmica.

Tomando de base la norma Europea EN-12975-2:2006, se propone un método para la caracterización térmica de un concentrador solar de geometría variable. Este método consiste en combinar valores obtenidos del IAM mediante *ray-tracing* con medidas experimentales a diferentes temperaturas de trabajo. Previamente es necesaria una validación del modelo teórico *ray-tracing* con medidas experimentales a temperatura ambiente.

7.2.1. Descripción del prototipo CCStaR V1

La descripción en detalle del diseño del CCStaR V1 cae fuera del objeto de la presente Tesis Doctoral. Para conocer algunos detalles sobre el diseño ver las patentes relacionadas (Martínez Moll et al., 2007b), (Martínez Moll et al., 2007a) y el trabajo publicado en (Martínez et al., 2008).

El concentrador solar CCStaR V1 consta de una superficie reflectora formada por 16 paneles reflectores y 32 tubos de vacío tipo Sydney. Las dimensiones del concentrador son 4.5 m de ancho por 6 m de largo, con una superficie bruta de 27 m^2 . La superficie neta reflectora es de 23.97 m^2 . El sistema de posicionamiento para los tubos receptores consta de un marco que soporta dichos tubos sujeto por cuatro brazos articulados accionados por dos motores sincronizados para el seguimiento solar. El marco de soporte para los tubos de vacío presenta dos colectores para distribuir el fluido caloportador (agua) a los tubos receptores. Los tubos receptores están conexiados en paralelo con los colectores, y los colectores están conectados en serie entre sí. En la Figura 7.26 se muestra una imagen del diseño en 3D, y en la Figura 7.27 una imagen del CCStaR V1 una vez construido y en funcionamiento. El concentrador se ubicó en la terraza del edificio *Beatriu de Pinós* del campus de la UIB, con una inclinación $\beta_c=15^\circ$ y orientación $\gamma_c=-9^\circ$ (desviado 9° hacia el Este).

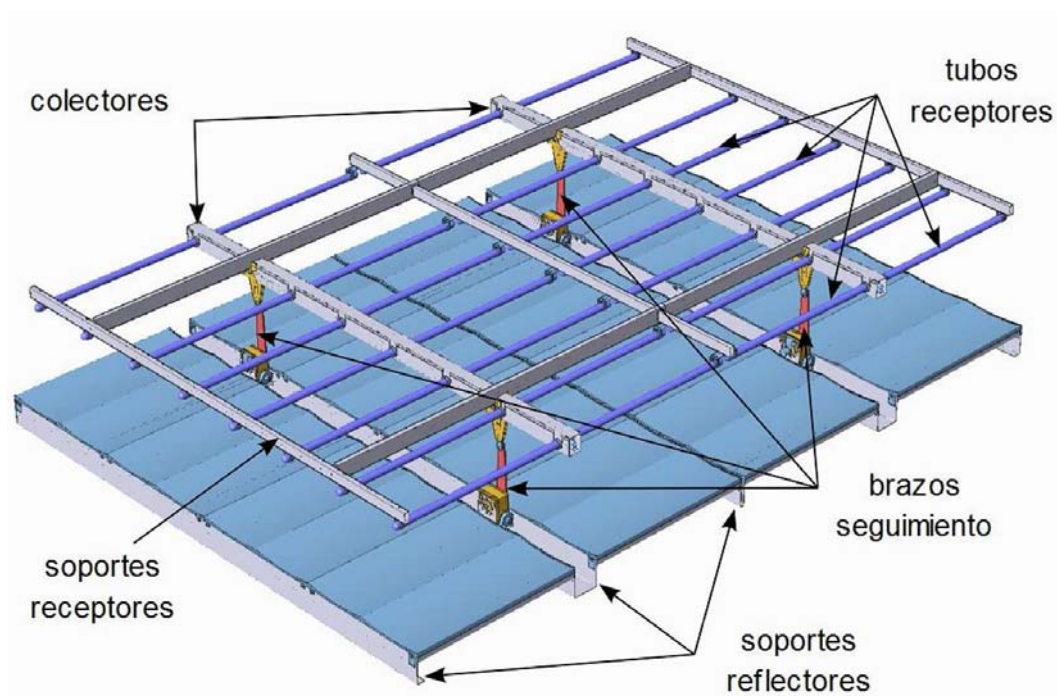


Figura 7.26: Vista diseño 3D del prototipo CCStaR V1



Figura 7.27: Prototipo CCStaR V1

A continuación se describen las partes más relevantes del concentrados solar.

El reflector

La superficie reflectora está formada por 16 paneles reflectores conformados tipo *sandwich*, donde la tapa superior es una lámina de aluminio reflectante de primera superficie (preparado para aplicaciones de captadores solares de concentración), y la tapa inferior es una chapa de acero galvanizado. El interior del panel, y elemento que le da la forma y estructura mecánica, es espuma de poliuretano. El procedimiento de fabricación del panel reflector ha sido protegido vía patente de invención (Martínez Moll et al., 2007a).

El proceso de fabricación consiste en primer lugar en cortar y curvar las láminas metálicas, en segundo lugar colocar la lámina reflectante en un contra molde con la finalidad de dar la forma adecuada a la superficie reflectante (perfil parabólico), en tercer lugar introducir un armazón metálico que tiene funciones mecánicas y geométricas, en cuarto lugar introducir una mezcla de isocianato y polioliol que dará lugar a espuma de poliuretano una vez transcurrido el proceso de curado, y por último incorporar la lámina trasera de acero galvanizado y tapar el molde. El proceso se lleva a cabo dando presión a ambas láminas metálicas para contrarrestar la presión que los reactivos realizan al reaccionar. La presión máxima alcanza 50 bar. El tiempo en el proceso de curación oscila entre 40 y 50 minutos dependiendo de las condiciones del ambiente.

En la Figura 7.28 se muestra una sección del panel reflector. En la Figura 7.29a) se muestra el molde para la fabricación del reflector, y en la Figura 7.29b) una imagen durante el proceso de desmoldado. Por último, en la Figura 7.30 se puede ver el panel reflector una vez fabricado. Cada reflector consta de dos parábolas, y las dimensiones netas de cada una de ellas es 540.4 mm de apertura y 1386 mm de longitud.

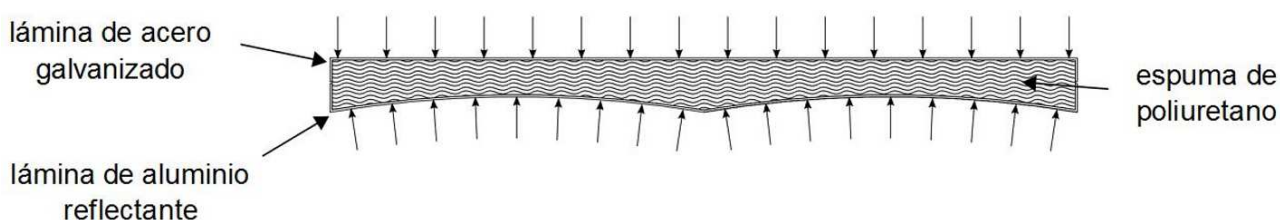


Figura 7.28: Panel reflector del CCStaR V1. Las flechas pequeñas indican la presión que se realiza durante el proceso de curado

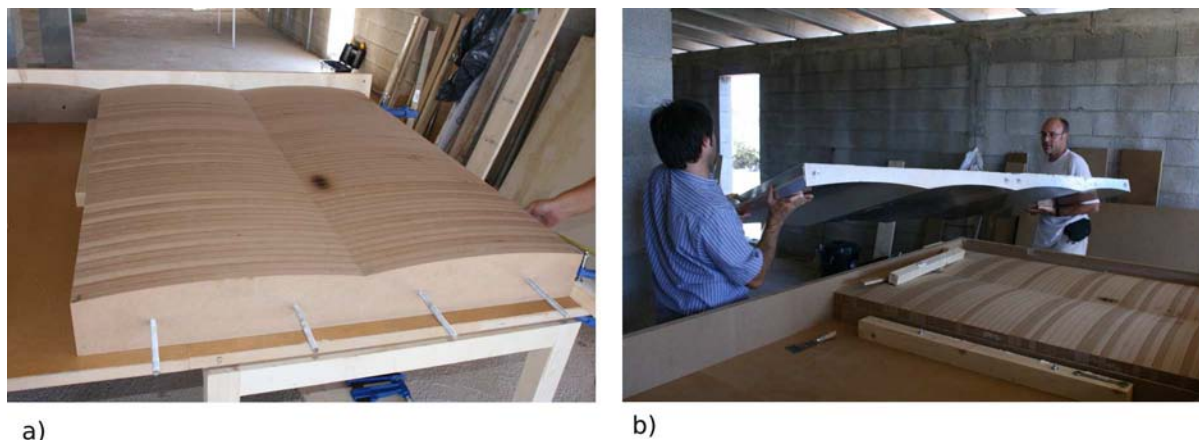


Figura 7.29: a) Molde para la fabricación del panel reflector. b) Imagen de un proceso de desmoldado



Figura 7.30: Dos de los paneles reflectores (4 parábolas) que forman la superficie reflectora del CCStaR V1

En la Figura 7.31 se muestra una composición para conocer cualitativamente la calidad geométrica de las parábolas construidas, se aprecian los rayos reflejados de cuatro parábolas pertenecientes a dos paneles reflectores. En la Figura 7.32 se muestra una ampliación de la zona donde se ubica el receptor para cada una de las parábolas de la imagen anterior. Se observa que el extremo de la parábola donde acaba el panel reflector presenta mayor dispersión angular que el extremo opuesto. Este efecto estuvo relacionado con una pequeña holgura existente en la cavidad del molde. Como se verá a continuación, se pudo solventar este pequeño problema y los reflectores fabricados posteriormente no presentaban tal dispersión angular.

Aún así se observa que la mayoría de la radiación reflejada interceptaba en la posición teórica del receptor. Con este método se comprobó de manera cualitativa que los rayos reflejados para ángulos de incidencia transversal $\theta_t=0^\circ$, 15° , 30° , 45° , y 60° interceptaban en la posición teórica del receptor.

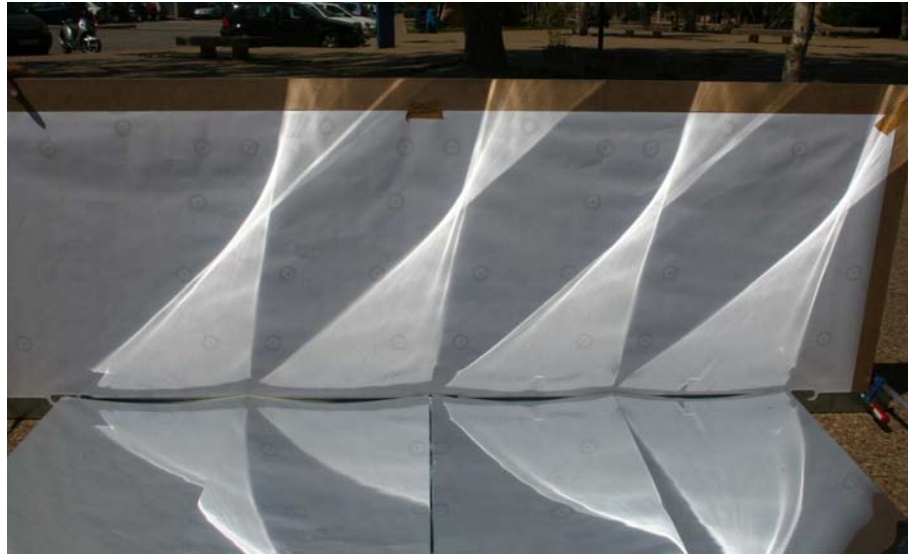


Figura 7.31: Imagen de los rayos reflejados para una valoración cualitativa de la geometría fabricada. Ángulo de incidencia transversal $\theta_t=30^\circ$

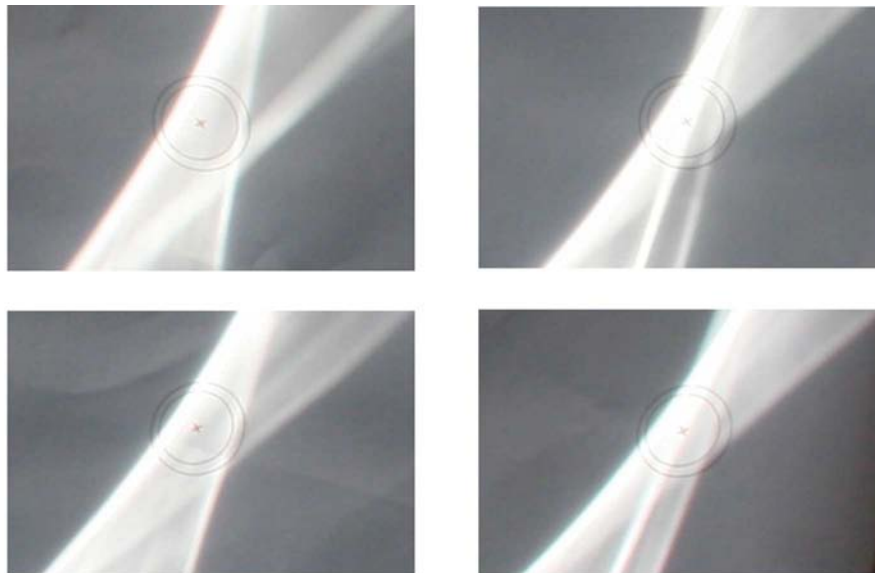


Figura 7.32: Imagen de la radiación solar reflejada en la zona del receptor

Para conocer la calidad geométrica de las parábolas fabricadas de manera cuantitativa, se procedió a medir el flujo local de concentración incidente en la zona del receptor mediante una cámara CCD. Las especificaciones de la cámara se encuentran en la Tabla 7.6. Para una distancia al objeto de 1645 mm, se obtuvo una resolución de 0.625 mm en la imagen obtenida.

Longitud horizontal	22.4 mm
Longitud vertical	14.8 mm
nº Pixels	10.5 M
Pixel horizontal	3986
Pixel vertical	2634
Distancia focal	20

Tabla 7.6: Especificaciones técnicas de la cámara CCD

Se realizaron dos fotografías en blanco y negro de la radiación reflejada sobre un blanco de dos parábolas escogidas al azar, y para una sección de cada parábola también escogida al azar. La primera parábola presentaba el problema mencionado en el procedimiento de fabricación, en la segunda parábola el error ya se había solventado. En las Figuras 7.33a) y 7.33b) se expone el flujo de concentración (en soles) para incidencia normal en función de la posición local transversal del receptor. En las gráficas también se expone la curva de concentración obtenida mediante *ray-tracing* asumiendo una tamaño angular del Sol caracterizado con $\text{CSR}=0.05$ y una dispersión angular de los espejos de $\sigma=7.5$ mrad. Este valor no tiene en cuenta la componente del seguimiento solar, ver Ecuación (5.1), y pertenece al valor que mejor se ajustaba a la curva experimental. Para ello un millón de rayos fueron emitidos en el experimento numérico, y se discretizó la posición transversal del receptor en elementos de 0.5 mm.

La Figura 7.33a) pertenece al caso de un espejo parabólico con el defecto de fabricación comentado anteriormente, se puede observar que parte de la radiación se escapa por el extremo derecho provocando que no se alcance la concentración pico esperada que es de unos 33 soles. En este caso el coeficiente de correlación entre ambas curvas es de $R^2=0.9589$. En cambio, en la Figura 7.33b) se expone el caso donde el defecto de fabricación ya se había corregido. Se observa una gran similitud entre la curva teórica y la curva experimental. Se puede ver que prácticamente se alcanza la concentración de radiación pico esperada de 33 soles. No obstante, también se observa una diferencia substancial entre las colas de ambas campanas. Esto es debido a que el modelo teórico mediante *ray-tracing* no tiene en cuenta una segunda Gaussiana, que aparecería a consecuencia del proceso de bobinado, de acuerdo a lo que propone Pettit (1977) en el caso de un reflector metálico de primera superficie. Aún así el ajuste entre ambas curvas es muy buena, alcanzando un coeficiente de correlación de $R^2=0.9937$. Por último, el factor de intercepción para incidencia normal del espejo (b) determinado de manera experimental es de $\gamma=0.9915$, frente al valor de $\gamma=0.9997$ para el caso

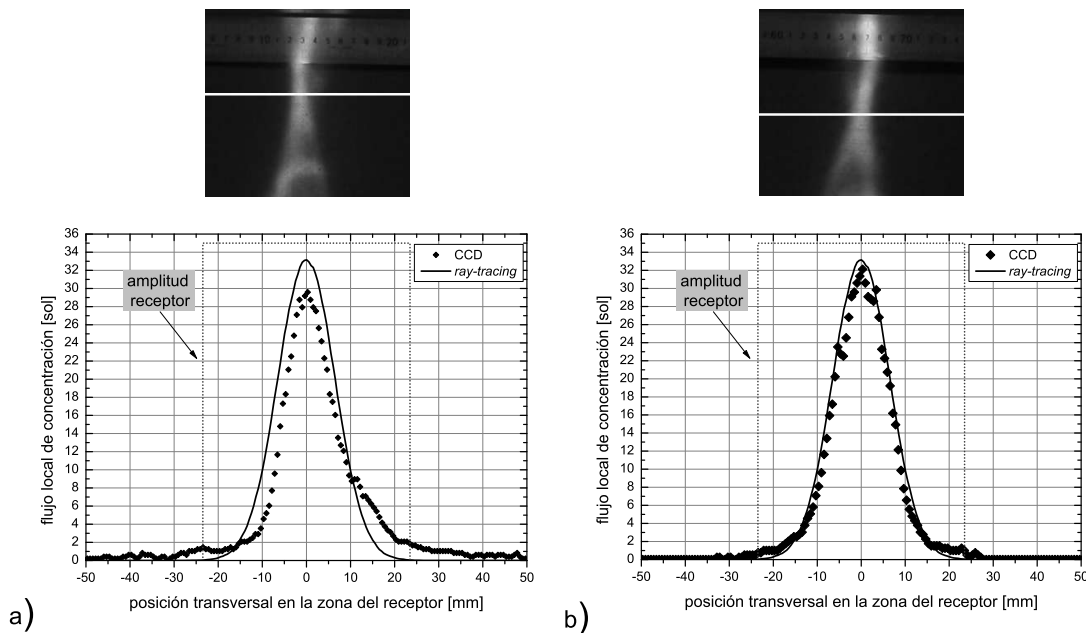


Figura 7.33: Flujo local de concentración en función de la posición transversal del receptor y fotografías obtenidas mediante la cámara CCD: a) Reflector con defecto de fabricación. b) Reflector sin defecto de fabricación.

teórico. El efecto de las colas se puede cuantificar por la diferencia entre estos dos últimos valores, que es inferior al 1 %.

El receptor

En el inicio del proyecto se decidió utilizar receptores disponibles en el mercado en lugar de desarrollar un nuevo receptor para el CCStaR V1. Cuando la superficie absorbedora tiene forma plana, resulta necesario producir una rotación del receptor sobre su propio eje para mantenerlo en una posición lo más perpendicular posible a los rayos incidentes a media que cambia la posición del receptor debido al seguimiento solar. Debido a las complicaciones de tipo mecánico que esto produce, se decidió utilizar receptores con una superficie absorbedora en forma cilíndrica que permiten prescindir de esta rotación. Ver la Figura 7.34 para una visualización del *ray-tracing* para esta configuración. Ahora bien, con esta solución, la concentración geométrica ya no se reduce a la mitad respecto a la concentración de aperturas como ocurría con un diseño de aleta plana, si no que ahora se reduce en un factor π : $C_a = \pi C_g$.

Como se ha podido ver en el Capítulo 6, diseños con un espejo parabólico, $F/W=1.5$, y valores comprendidos entre $C_a=7-10$ presentan un buen comportamiento térmico en el rango de

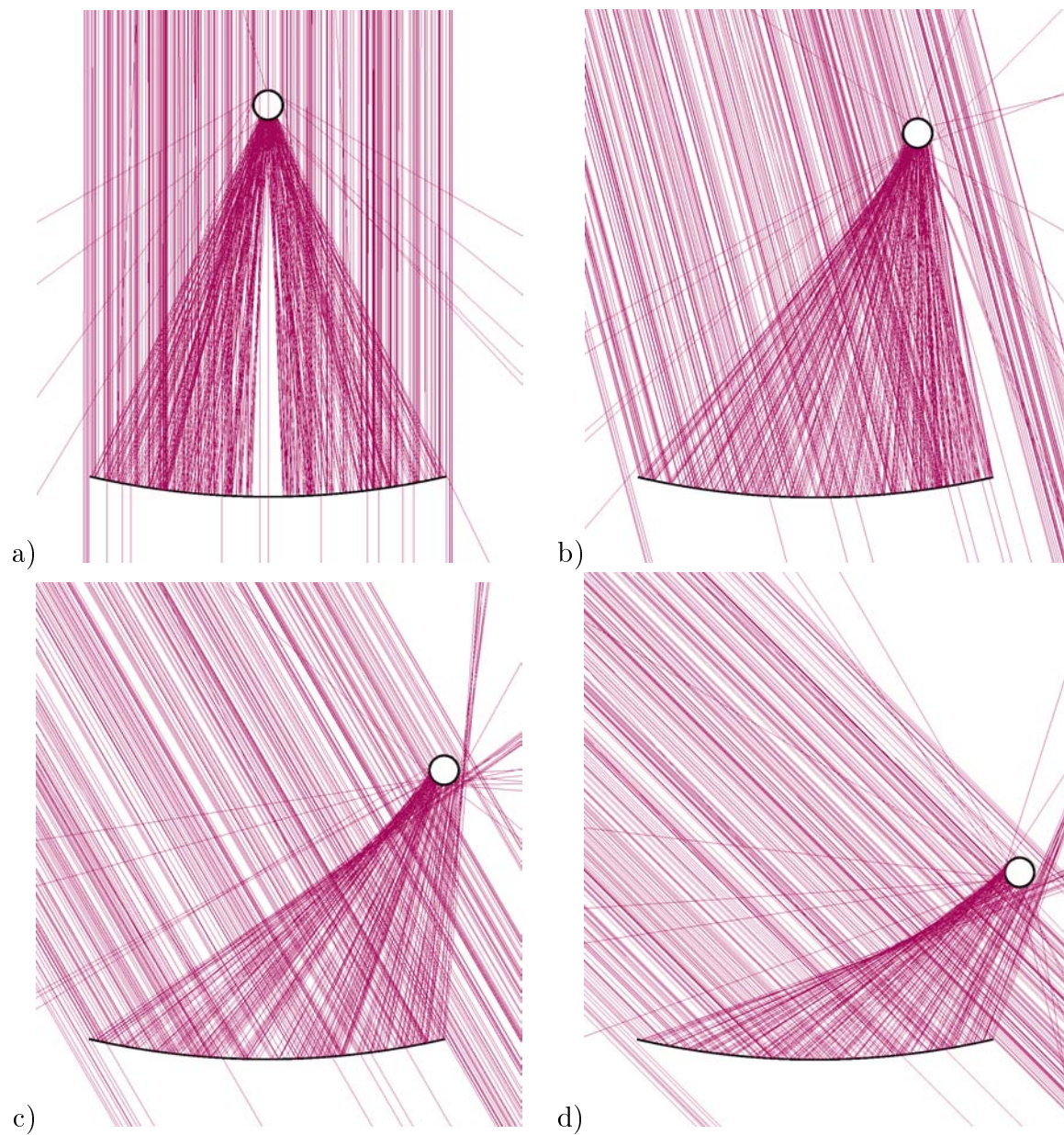


Figura 7.34: Visualización del *ray-tracing* para el reflector y el tubo receptor del CCStaR V1:
a) Incidencia normal. b) $\theta_t = 15^\circ$. c) $\theta_t = 30^\circ$. d) $\theta_t = 45^\circ$.

media temperatura. Ahora bien, considerando una superficie absorbidora cilíndrica, la superficie de radiación es mayor y por tanto también son mayores las pérdidas térmicas. Entonces una concentración de aperturas algo mayor que 10 podría tener mejor comportamiento. Por lo tanto para el CCStaR V1 fue requerido un absorbedor con un diámetro inferior a 54 mm. El único tipo de receptor disponible en el mercado con esta geometría fue el de tipo Sydney. En el diseño se optó por un tubo absorbedor de 47 mm de diámetro alcanzando así una concentración $C_a=11.5$, lo que implica una concentración geométrica de $C_g=3.66$. La longitud neta del cilindro absorbedor es de 1370 mm. Ver la Figura 7.35a) para las cotas interiores de la sección y la Figura 7.35b) para las cotas exteriores longitudinales.

Cabe mencionar también que el principal motivo por el cual se optó por este tipo de receptor fue la disposición por parte de los fabricantes para la elaboración de un tubo receptor con una longitud no estándar a la que se fabricaba habitualmente. Gracias a esta disposición fue posible adaptar un tubo receptor comercial al prototipo CCStaR V1.

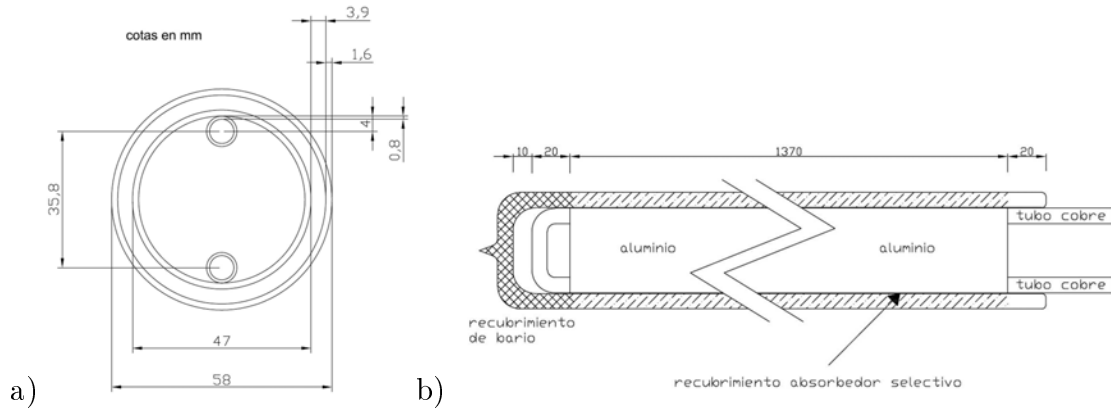


Figura 7.35: a) Cotas interiores del tubo receptor. b) Cotas longitudinales del tubo receptor en mm

En los tubos tipo Sydney, el calor es absorbido por la capa interior de vidrio y luego se transfiere a un tubo de cobre en forma de U a través de una aleta de aluminio. En la Figura 7.36a) se muestra una sección del tubo receptor con la composición de los diferentes materiales. Las principales ventajas de este tipo de receptor son su bajo coste y un buen sellado del volumen evacuado. Por otro lado, la baja conductividad del absorbedor a través del vidrio requiere altos incrementos de temperatura con el fin de transferir la radiación incidente. Este problema se incrementa por el hecho de que es muy difícil asegurar un perfecto contacto entre el vidrio y la aleta de aluminio, y entre la aleta de aluminio y el tubo de cobre.

Para valorar la diferencia de temperaturas que se produce, en la Figura 7.36b) se muestra la distribución de temperaturas simulada para el caso de una radiación concentrada que llega al tubo lateralmente, se ha supuesto $G_b = 900 \text{ W/m}^2$, estos resultados son tomados del trabajo (Martínez et al., 2008). En este modelo tan sólo se tuvo en cuenta la transferencia de calor por

conducción entre los diferentes elementos en contacto, y un espacio de aire de 0.1 mm entre los mismos (vidrio-aluminio y cobre-aluminio). El espacio de separación de aire considerado podría resultar un caso real, y a la vez muy desfavorable. A pesar de que el modelo considerado aquí es bastante sencillo, y que un modelo más complejo sería necesario con la finalidad de predecir con más precisión los valores absolutos de temperatura, los resultados obtenidos son representativos para estimar el orden de magnitud de los gradientes de temperatura relativos entre la zona de vidrio y las partes metálicas.

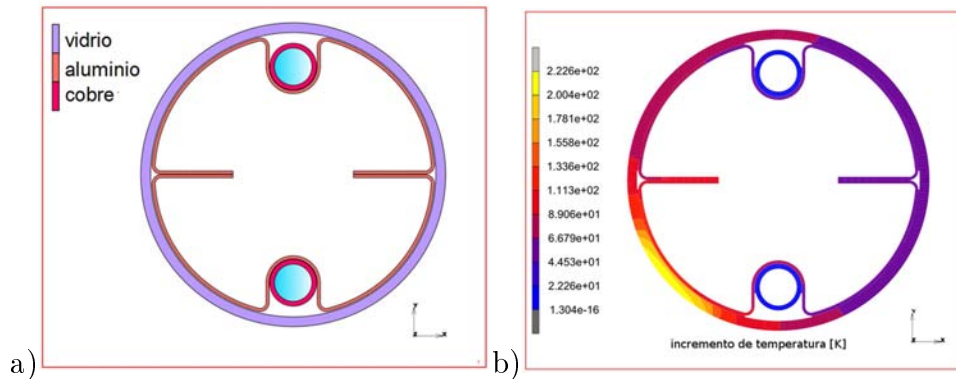


Figura 7.36: a) Sección del tubo receptor Sydney mostrando la composición de materiales. b) Incremento de temperatura en condiciones estáticas de radiación solar. (Martínez et al., 2008)

Estos gradientes de temperatura, a parte de producir una moderada reducción en la eficiencia térmica del receptor, son los responsables de la rotura de algunos de los tubos debido a los esfuerzos térmicos que producen, ver la Figura 7.37. Estas roturas (hasta un total de 9 tubos) se produjeron mayoritariamente para ángulos próximos a la incidencia normal que es cuando los picos de radiación son más elevados. Aunque estas roturas fueron la causa principal por la que se decidió cambiar el tipo de tubos en la siguiente evolución del captador CCStaR, no fueron un impedimento para que se pudiese realizar el ensayo del captador y su caracterización térmica. Para evitar la rotura de los mismos se procedió a ensayar el CCStaR V1 en ángulos del Sol en un rango alejado de la incidencia normal al captador. En la Figura 7.38 se muestra una imagen durante el proceso de montaje de los tubos evacuados, y dos imágenes con todos los tubos ya instalados.

En cuanto a la trayectoria que describe el receptor, como se ha podido ver en el Capítulo 6 Figura 6.13, la posición del receptor recorriendo el círculo generatriz para el caso de $N=1$ no es la más apropiada para interceptar el máximo de energía reflejada, ya que parte de la energía se escapa por el extremo exterior del mismo. Así pues, para interceptar el máximo de energía según la posición del Sol, en el diseño del CCStaR V1 se modificó la trayectoria del receptor con la ayuda del *ray-tracing*, y optimizar así la energía capturada, (Martínez Moll et al., 2007b).



Figura 7.37: Rotura de tubos receptores



Figura 7.38: Montaje de los tubos receptores y vistas del montaje completado

7.2.2. Análisis de la calidad geométrica del CCStaR V1

Conocer la geometría del CCStaR una vez construido es necesario por dos motivos, el primero para tener constancia de la calidad geométrica del proceso de fabricación y construcción, y en segundo lugar disponer de los datos necesarios para realizar una simulación en *ray-tracing*, y disponer así de un modelo teórico para calcular el valor del IAM en cualquier posición relativa del Sol. Esto último es de suma importancia para la caracterización óptica de un concentrador solar de geometría variable de grandes dimensiones, dado que no es posible realizar una orientación del mismo que permita determinar la eficiencia óptica para incidencia normal. Por tanto, disponer de un modelo teórico validado para determinar la eficiencia óptica resulta ser una buena solución, a no ser que se disponga de un número suficientemente grande de medidas experimentales que cubra todo el rango del posicionamiento solar respecto al concentrador solar.

A pesar de que existen métodos de alta precisión para conocer la posición geométrica de cada uno de los elementos en concentradores solares, y la geometría de los espejos curvos; i. e. (Lüpfert et al., 2005, 2007) véase métodos fotográficos-geométricos (Pottler et al., 2005); en el caso del CCStaR V1, debido al tipo de seguimiento solar, los errores dimensionales que tienen un efecto más pronunciado sobre la eficiencia del prototipo son los errores de posicionamiento del receptor respecto a su posición teórica. Debido a la baja concentración geométrica del CCStaR es suficiente determinar estos errores con una precisión de ± 1 mm, que es posible medir mediante métodos simples y económicos como pies de rey y medidores láser.

El método utilizado para caracterizar la geometría se basa en un medidor láser (precisión ± 0.5 mm) y un pie de rey (precisión ± 0.1 mm). El procedimiento de medida permitió determinar la posición relativa de cada tubo receptor respecto al reflector parabólico al que pertenece. En la Figura 7.39 se muestra una imagen de las medidas que son objeto para determinar, donde aparece un tubo receptor con su respectiva parábola, y las desviaciones que son objeto en la medición. Para ello se procedió a realizar las siguientes medidas:

1. medir la posición vertical relativa entre los tubos receptores (extremos A y B definidos en la Figura 7.39) y los reflectores, ver Figura 7.40
2. medir la distancia relativa horizontal entre los diferentes tubos de vacío (extremos A y B), ver Figura 7.41
3. medir la posición relativa horizontal entre los tubos receptores extremos y las vigas soporte de los reflectores, ver Figura 7.42
4. medir la posición relativa entre reflectores, ver Figura 7.43a)
5. medir la posición relativa de los reflectores extremos y las vigas de soporte, ver Figura 7.43b)

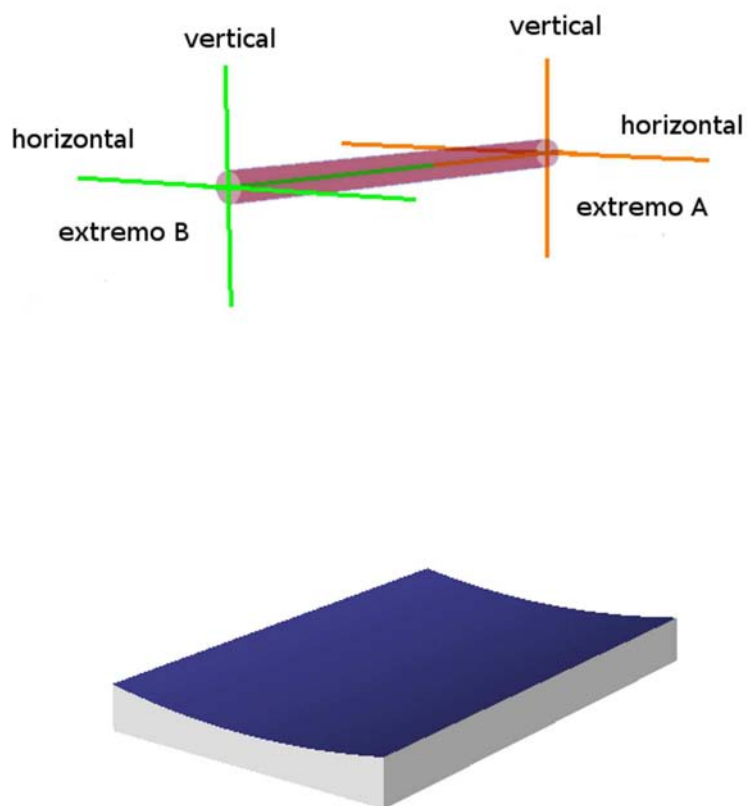


Figura 7.39: Desviación en el posicionamiento relativo, horizontal y vertical, de los extremos A y B, entre el tubo receptor y el espejo parabólico

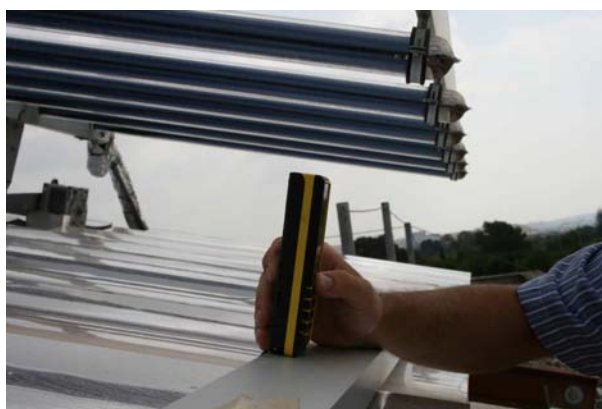


Figura 7.40: Medición de la posición relativa entre los extremos de los tubos receptores y los espejos parabólicos. Se muestra el extremo B

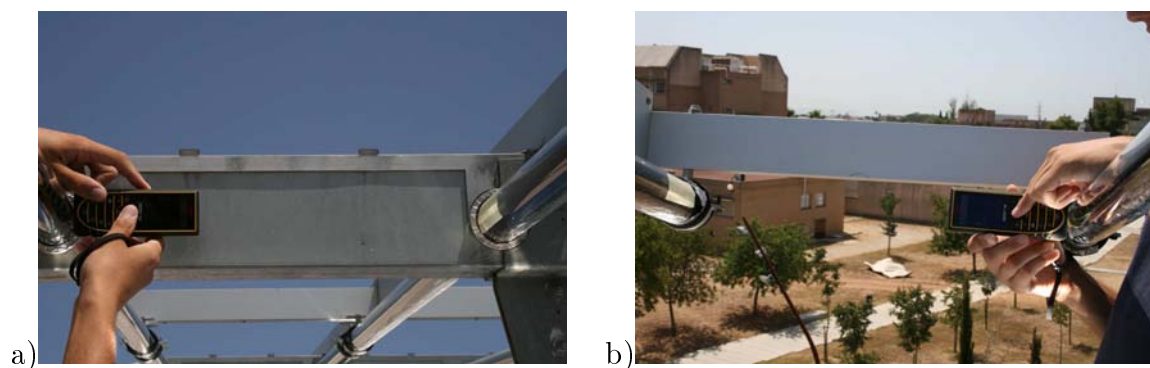


Figura 7.41: Medición de la posición relativa horizontal entre los extremos de los tubos receptores. a) Extremo A. b) Extremo B



Figura 7.42: Medición de la posición relativa horizontal entre tubos receptores extremos y las vigas soporte de los reflectores

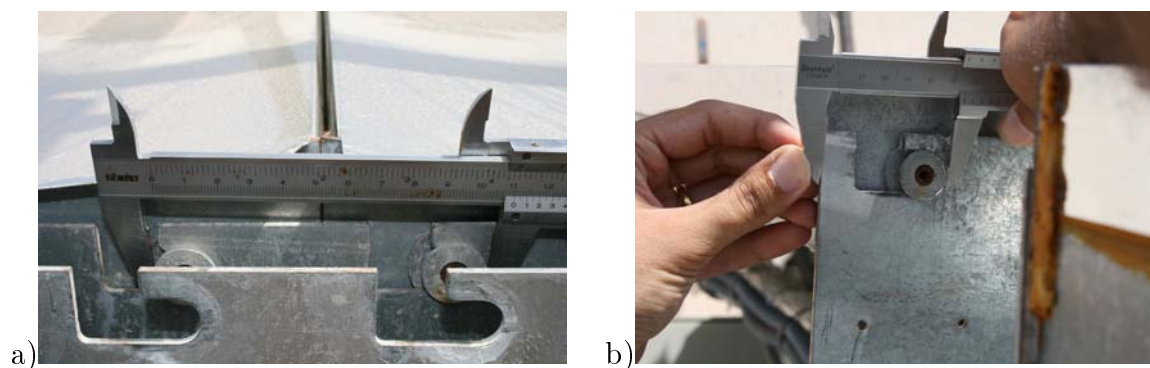


Figura 7.43: a) Medición de la posición relativa horizontal entre reflectores. b) Medición de la posición relativa horizontal entre reflectores extremo y las vigas soporte de los reflectores

Las mediciones fueron llevadas a cabo por el Grupo de Investigación EEGE (*Grup d'Enginyeria de l'Edificació i la Gestió Energètica*) de la UIB, al cual pertenece el autor de la Tesis Doctoral. Una vez procesados los datos, se obtuvieron los valores en el error de posicionamiento entre los tubos receptores y las parábolas. En las Tablas 7.7 y 7.8 se muestran dichos valores. Se han etiquetado los tubos dependiendo de la línea transversal y línea longitudinal a la que pertenecen. El primer tubo que se encuentra en el extremo Norte y al Oeste pertenece a la línea longitudinal 1 y a la línea transversal 1.

De la Tabla 7.7 se puede observar que el error relativo en la dirección horizontal para todos los casos es ≤ 4 mm. Este error, que es muy inferior a las dimensiones totales del concentrador solar, puede ocasionar pérdidas significativas para ángulos distintos a incidencia normal, dado que una pequeña variación en la componente transversal hace que se intercepte menos energía como se ha podido ver en la Figura 6.13. No obstante, se observa que 30 tubos receptores están posicionados con un error horizontal ≤ 2 mm.

Por otro lado, respecto a los errores de posicionamiento vertical, ver Tabla 7.8, resulta que los tubos centrales presentan mejor posicionamiento que los tubos en los extremos. Los tubos extremos presentan una desviación de posicionamiento que alcanza los 18 mm. Esto es debido a la deformación de las vigas soporte de los tubos receptores. Esta desviación también producirá pérdida en la interceptación de energía reflejada. En este caso se observa que 14 tubos están posicionados con un error vertical ≤ 2 mm.

Para finalizar, se midió también el error longitudinal de posicionamiento entre las vigas de soporte de los reflectores, ver Figura 7.26, obteniendo un valor máximo de 3 mm. Este error no influye de forma significativa para la interceptación de la radiación solar, ya que se trata de un concentrador solar lineal cuyos efectos de borde por este efecto son despreciables.

Error relativo de posicionamiento horizontal [mm]		Línea longitudinal							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Línea transversal 1	extremo A	-1	0	1	0	-1	2	2	0
	extremo B	-1	-1	0	0	0	0	-1	-1
Línea transversal 2	extremo A	0	1	0	0	-1	-1	1	2
	extremo B	1	1	1	1	3	2	4	2
Línea transversal 3	extremo A	0	1	0	1	1	1	0	1
	extremo B	1	1	1	1	2	1	0	0
Línea transversal 4	extremo A	0	1	-1	0	0	0	2	2
	extremo B	0	0	-2	1	-1	1	2	-1

Tabla 7.7: Error de posicionamiento horizontal entre los tubos receptores y las parábolas

Error relativo de posicionamiento vertical [mm]		Línea longitudinal							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Línea transversal 1	extremo A	-1	-4	-5	-6	-8	-10	-11	-12
	extremo B	2	-2	-3	-1	-1	-1	0	0
Línea transversal 2	extremo A	1	1	1	1	2	1	5	3
	extremo B	-1	-1	0	0	2	2	3	0
Línea transversal 3	extremo A	0	-1	0	2	1	2	2	2
	extremo B	2	2	1	1	1	0	0	3
Línea transversal 4	extremo A	0	-2	-3	-3	-2	-3	-2	-4
	extremo B	-8	-10	-13	-14	-14	-15	-15	-18

Tabla 7.8: Error de posicionamiento vertical entre los tubos receptores y las parábolas

7.2.3. Comportamiento óptico del CCStaR V1 mediante *ray-tracing*

En esta Sección se determinan las curvas IAM transversal y longitudinal del prototipo CCStaR V1 mediante *ray-tracing*. Se ha introducido toda la geometría con los errores de posicionamiento, y las propiedades ópticas de cada uno de los materiales que lo forman. En cuanto a los tubos receptores, se ha considerado un coeficiente de extinción $k = 8 \text{ m}^{-1}$ y un coeficiente de refracción $n=1.56$ para el vidrio, la dependencia angular en la absorptividad se ha caracterizado por los coeficientes $\alpha_0=0.95$, $b=0.057$ y $c=1.2$ (Tesfamichael and Wäckelgård, 2000), Ecuación (2.28). Respecto a la calidad óptica del reflector se ha estimado una reflectividad total de $\rho_{2\pi}=0.91$ y $\sigma_B=10$ mrad para la dispersión angular total de los espejos. Cabe resaltar que el valor considerado aquí es superior al considerado en la Sección 7.2.1, $\sigma=7.5$ mrad, debido a que se considera una imprecisión de posicionamiento en el receptor de $\pm 0.4^\circ$ (valor estimado a partir del análisis del mecanismo de posicionamiento solar). Por otro lado, se ha supuesto un factor de transferencia de calor $F_{av}=0.97$. Este valor ha sido ajustado una vez realizadas las simulaciones en *ray-tracing*, tal como se hizo en la Sección 7.1.5 para el prototipo CCStaR V0. Ver la Figura 7.44 para una visualización del *ray-tracing* del CCStaR V1.

Antes de cada uno de los ensayos experimentales, se procedió a realizar una limpieza en profundidad tanto de los reflectores como de los tubos receptores. Entonces se supone que no existen pérdidas como efecto de la suciedad.

Se ha determinado, mediante la emisión de un millón de rayos y considerando un tamaño angular del Sol caracterizado por $\text{CSR}=0.05$, que la eficiencia óptica del CCStaR V1 en incidencia normal es de $\eta_0=68.8 \%$ (incluye el factor $F_{av}=0.97$), y que el factor de intercepción es del $\gamma=92 \%$. Se observa aquí que, debido a las desviaciones en el posicionamiento de los tubos receptores y del mecanismo de seguimiento solar, se intercepta tan sólo el 92% en comparación al 99.97% en el caso teórico expuesto en la Figura 7.33b).

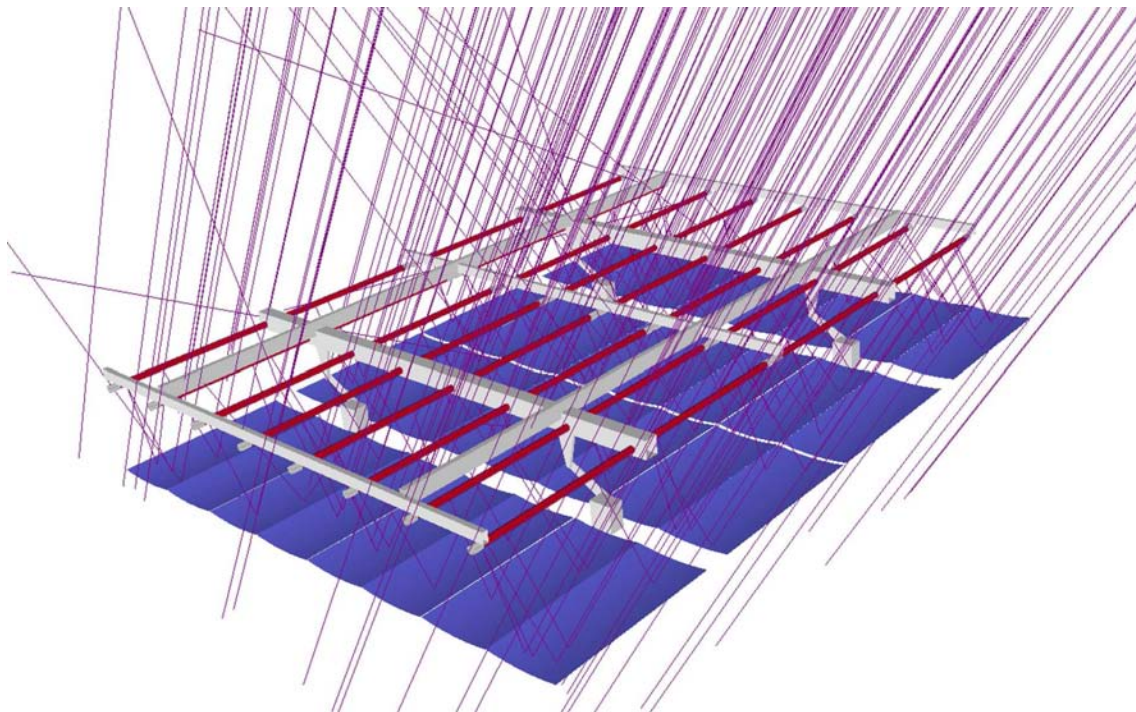


Figura 7.44: Visualización del *ray-tracing* para el CCStar V1

En la Figura 7.45 se muestra la eficiencia óptica transversal y longitudinal, esto es $\eta_0 \times K_t$ y $\eta_0 \times K_l$ respectivamente. En las gráficas se compara con el diseño considerado en el Capítulo 5, a este diseño se le ha llamado *diseño teórico*, que corresponde a valores de $N=1$, $F/W=1.50$ y $C_a=11$. En el *diseño teórico* también se ha considerado un factor $F_{av}=0.97$.

De la Figura 7.45 se puede observar que la eficiencia óptica transversal del prototipo es mayor a la del *diseño teórico* para ángulos que pertenecen a la zona $\theta_t=40^\circ-54^\circ$. Esto se debe a que el posicionamiento del receptor ha sido modificado respecto al diseño teórico con la finalidad de interceptar el máximo de la energía reflejada. No obstante, en la gran parte del rango la eficiencia transversal del CCStar V1 es inferior, lo que indica que las pérdidas causadas por las imprecisiones son mayores a las ganancias causadas por el seguimiento solar optimizado. En comparación con el *diseño teórico*, el prototipo alcanza una eficiencia óptica en incidencia normal del 68.8 % frente al 76 %. Esta reducción viene dada por los elementos de sombra y errores de posicionamiento principalmente. Por último, se observa una rápida disminución al superar el ángulo $\theta_t=60^\circ$, dado que el CCStar V1 presenta un ángulo límite para el posicionamiento del foco $\theta_{f,LIM}=120^\circ$.

En cuanto a la eficiencia óptica longitudinal se observa un comportamiento muy por debajo del caso teórico. Esto es debido a la ausencia de superficie reflectora en la dirección longitudinal entre vigas transversales de soporte, sumado también a la ausencia de superficie absorbadora en la dirección longitudinal entre colectores para la distribución del fluido

caloportador.

Se concluye que una modificación en la disposición de los elementos (tanto reflectores como receptores) podría mejorar sustancialmente el comportamiento óptico del concentrador. También cabe minimizar los errores de posicionamiento relativo entre receptores y reflectores en futuros diseños.

En la Figura 7.46 se muestran las curvas IAM estándar del Prototipo CCStaR V1.

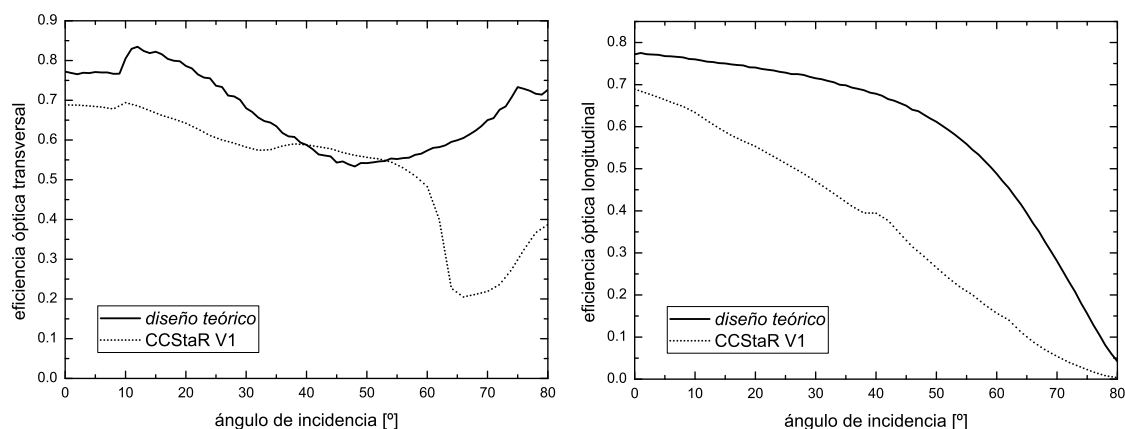


Figura 7.45: Eficiencia óptica transversal y longitudinal del prototipo CCStaR V1 y del *diseño teórico* con valores $N=1$, $F/W=1.50$ y $C_a=11$

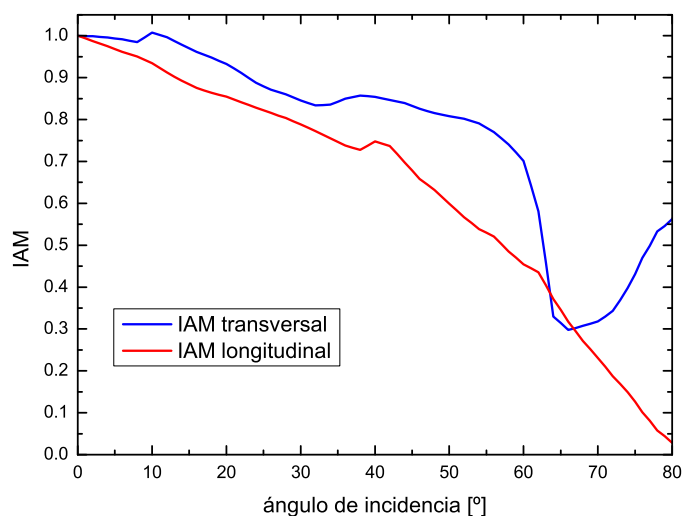


Figura 7.46: Curvas IAM del prototipo CCStaR V1

7.2.4. Banco de ensayos y equipos de medida

Se construyó un banco de ensayos para determinar experimentalmente la eficiencia del CCS-taR V1. El banco de ensayos está basado en el circuito de bucle cerrado de ensayos propuesto en la norma EN-12975-2:2006. La mayoría de componentes utilizados son los mismos que para el banco de ensayos descrito en la Sección 7.1.2. Se ubicó en la azotea del edificio *Beatriu de Pinós* del campus de la *UIB* junto al prototipo. El banco de ensayos está constituido por un conjunto de equipos de medida y actuadores integrados en un circuito hidráulico, un equipo de captación de medidas, y elementos medidores de las condiciones climáticas. En la Figura 7.47 se expone el esquema hidráulico y dispositivos de medida.

El banco de ensayos permite regular la temperatura entre 130^oC y temperatura ambiente. Para ello se dispone de un aerotermo y una enfriadora de 5kW para disipar la energía capturada, y un depósito de inercia de 150 L para suavizar las variaciones de temperatura. La regulación se realiza mediante dos válvulas de tres vías motorizadas que permiten ajustar el caudal que circula por cada uno de los elementos, y una válvula manual de dos vías para el ajuste del caudal suministrado por la bomba, ver Figura 7.47. Las mediciones del piranómetro, pirheliómetro, temperaturas de entrada, de salida, y ambiente, y velocidad del viento son registradas por una tarjeta de adquisición de datos. Los valores son almacenados cada cinco segundos.

Se han utilizado todos los elementos descritos en la Sección 7.1.2, a diferencia del medidor de caudal volumétrico que se describe a continuación.

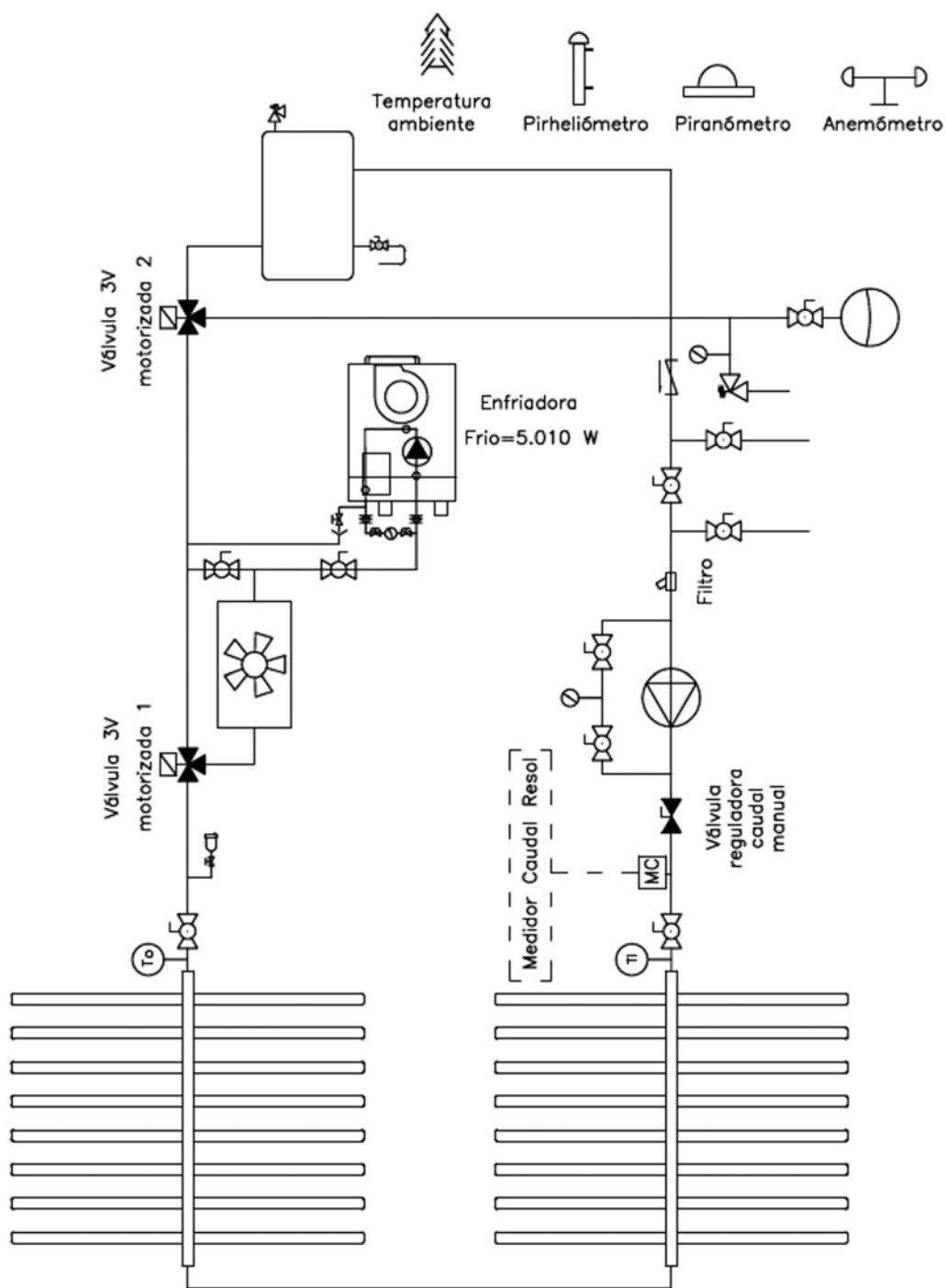


Figura 7.47: Esquema de principio para el ensayo del CCStaR V1

Medidor de caudal volumétrico

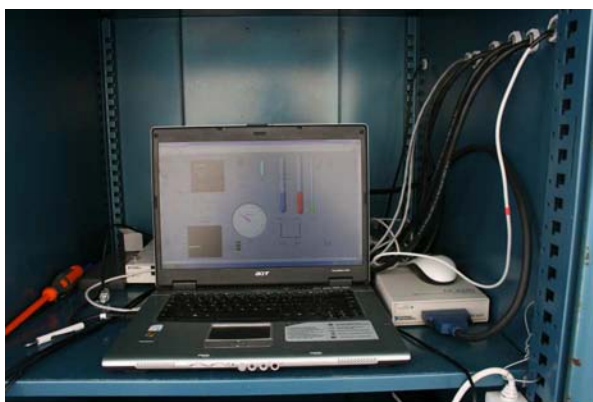
Para medir el caudal másico, se dispuso de un medidor de caudal RESOL modelo V40 del medidor de energía modelo WMZ-M1 de la misma marca. La precisión en la medida es de $\pm 0,01 \text{ m}^3/h$. A partir de la medida en caudal volumétrico, se obtuvo la medida en caudal másico con la ayuda de las propiedades termodinámicas del agua tabuladas (Incropera and DeWitt., 2001).



Figura 7.48: Caudalímetro utilizado en el banco de ensayos para CCStaR V1

Ubicación del Banco de Ensayos en el exterior

Se procedió a ubicar el banco de ensayos en el exterior. Los equipos de medida (PC industrial, teclado, pantalla, tarjetas de adquisición de datos, ...) se instalaron en un armario de acero preparado para la intemperie. Ver la Figura 7.42a. El circuito hidráulico y componentes se ubicaron en el espacio disponible del entorno, ver Figura 7.42b.



a)



b)

Figura 7.49: a) Equipos de medida. b) Algunos elementos del banco de ensayos (máquina enfriadora, aerotermo, depósito de inercia, vaso de expansión, bomba, válvulas 3V, ...)

7.2.5. Determinación experimental del comportamiento óptico del CCStaR V1

Se procedió a ensayar el prototipo a una temperatura media del fluido caloportador cercana a la temperatura ambiente, $T_{av} \approx T_a$, con la finalidad de comparar los valores obtenidos por *ray-tracing* y los resultados obtenidos en condiciones reales. El concentrador CCStaR V1 se instaló con una orientación 9°E e inclinación 15° , ver Tabla 7.9. Los ensayos experimentales fueron llevados a cabo entre los meses de julio y octubre del 2009.

Latitud	39.63° N
Longitud	2.65° E
α_c	0°
β_c	15°
γ_c	-9°

Tabla 7.9: Ubicación y orientación del CCStaR V1

Para obtener puntos fiables de funcionamiento, de todas las medidas que se realizaron, tan sólo se consideraron aquellas que cumplieran con los requerimientos expuestos en la Tabla 7.10. Se evitan así los posibles ruidos durante la adquisición de datos. Se procedió a un preacondicionamiento de 10 minutos en la temperatura de entrada del captador, y seguidamente se realizó una media de las medidas registradas durante 5 minutos.

Variable	Valor (Desviación)
Desviación en la temperatura de entrada en el captador ΔT_i	$(\pm 1\text{ K})$
Irradiancia directa en el plano del captador G_{Tb}	$> 400\text{ W/m}^2\ (\pm 7\text{ W/m}^2)$
Diferencia de temperatura de trabajo y ambiente $(T_{av} - T_a)$	$\pm 5\text{ [K]}$
Desviación del caudal volumétrico durante la medida	$(\pm 1\text{ \%})$
Desviación del caudal volumétrico durante toda la campaña	$(\pm 15\text{ \%})$
Tiempo de preacondicionamiento	10 minutos
Tiempo de medida estable para obtención de puntos fiables	5 minutos

Tabla 7.10: Requerimientos para la obtención de puntos fiables a partir de las medidas experimentales

En las Tablas 7.11 y 7.12 se muestran los valores registrados durante el período de ensayos que cumplen con los requerimientos expuestos. Se muestra también indicadores para examinar la bondad en dichos requerimientos. Se hicieron ensayos durante cinco días entre los meses de julio y octubre del 2009. Se pudo obtener un total de 45 puntos estables para la determinación de la eficiencia óptica.

Día	Punto	Valor medida experimental					Indicador			
	Medida	$T_i [K]$	$T_o [K]$	$T_a [K]$	$\dot{V} [m^3/h]$	$DNI [W/m^2]$	$T_{av} [K]$	$\Delta T_i [K]$	$\frac{dT_{av}}{dt} [K/s]$	$(T_{av} - T_a) [K]$
30/07/2009	A1	28.1	36.1	29.7	1.00	816	32.1	-0.2	-8.2E-04	2.5
	A2	27.9	36.1	29.8	1.00	820	32.0	-0.2	-1.5E-04	2.2
	A3	27.8	36.1	29.6	1.00	819	31.9	-0.1	-2.1E-04	2.3
	A4	27.7	36.1	29.5	1.00	821	31.9	0.0	1.8E-04	2.5
	A5	27.7	36.3	29.8	1.00	822	32.0	-0.1	2.1E-04	2.2
	A6	27.7	36.4	29.9	1.00	827	32.1	0.1	3.3E-04	2.2
	A7	27.9	36.7	30.2	1.00	832	32.3	0.0	7.6E-04	2.0
	A8	28.0	37.0	30.0	1.00	834	32.5	0.3	7.0E-04	2.5
	A9	28.1	37.2	30.1	1.00	833	32.7	0.1	6.1E-04	2.6
	A10	29.0	38.6	29.8	1.00	839	33.8	0.3	1.3E-03	3.9
19/08/2009	B1	33.9	41.4	36.9	1.00	823	37.7	-0.1	-1.8E-04	0.8
	B2	33.9	41.5	36.5	1.00	820	37.7	0.0	-1.5E-04	1.2
	B3	33.9	41.3	36.8	1.00	815	37.6	0.1	-3.1E-05	0.8
	B4	33.9	41.2	36.6	1.00	810	37.6	0.0	-3.9E-04	0.9
	B5	33.8	41.0	36.3	1.00	801	37.4	0.0	-3.3E-04	1.1
	B6	33.7	40.7	36.6	1.00	793	37.2	-0.3	-6.4E-04	0.6
	B7	33.5	40.4	36.4	1.00	787	36.9	-0.2	-9.4E-04	0.5
	B8	33.3	39.9	36.2	1.00	786	36.6	-0.2	-1.3E-03	0.4
	B9	33.1	39.5	36.1	1.00	780	36.3	-0.5	-1.5E-03	0.2
11/09/2009	C1	20.5	25.9	27.1	1.10	757	23.2	0.0	9.1E-05	-3.9
	C2	20.3	25.9	27.5	1.09	757	23.1	-0.5	-1.1E-03	-4.4
	C3	20.3	25.9	27.6	1.09	755	23.1	0.2	5.1E-04	-4.5
	C4	20.3	25.9	27.6	1.10	761	23.1	0.1	3.9E-04	-4.5
	C5	20.3	26.0	27.7	1.10	764	23.1	0.0	-3.0E-05	-4.6
	C6	20.3	26.2	27.7	1.10	778	23.3	0.2	6.6E-04	-4.5
	C7	20.4	26.4	27.9	1.10	790	23.4	0.1	3.9E-04	-4.5
	C8	20.6	26.7	27.8	1.10	788	23.6	0.0	5.7E-04	-4.2
	C9	20.7	26.9	28.1	1.10	783	23.8	0.3	8.8E-04	-4.3
	C10	21.0	27.2	27.9	1.10	787	24.1	0.3	8.2E-04	-3.8
	C11	21.2	27.5	28.0	1.10	780	24.3	0.2	1.1E-03	-3.7
	C12	21.4	27.8	28.5	1.10	783	24.6	0.3	1.1E-03	-3.8

Tabla 7.11: Medidas experimentales e indicadores para la eficiencia óptica

Día	Punto	Valor medida experimental					Indicador			
	Medida	$T_i [K]$	$T_o [K]$	$T_a [K]$	$\dot{V} [m^3/h]$	$DNI [W/m^2]$	$T_{av} [K]$	$\Delta T_i [K]$	$\frac{dT_{av}}{dt} [K/s]$	$(T_{av} - T_a) [K]$
06/10/2009	D1	21.7	27.1	28.1	1.11	829	24.4	0.0	6.0E-05	-3.7
	D2	21.6	27.1	28.8	1.11	832	24.3	-0.1	3.0E-04	-4.5
	D3	21.5	27.1	29.0	1.11	835	24.3	-0.1	2.1E-04	-4.7
	D4	21.5	27.2	29.0	1.11	837	24.4	-0.1	-3.0E-05	-4.6
	D5	21.5	27.3	28.7	1.11	837	24.4	0.1	2.4E-04	-4.3
	D6	21.6	27.4	28.5	1.11	837	24.5	0.1	5.1E-04	-4.1
	D7	21.6	27.5	28.9	1.11	837	24.6	0.1	3.3E-04	-4.3
	D8	21.8	27.7	29.0	1.10	840	24.8	0.3	7.3E-04	-4.2
07/10/2009	E1	23.6	29.7	28.9	1.14	870	26.6	0.0	-9.1E-05	-2.3
	E2	23.6	29.6	28.6	1.14	801	26.6	-0.1	-7.3E-04	-2.0
	E3	23.6	29.4	28.8	1.14	832	26.5	-0.1	4.8E-04	-2.3
	E4	23.6	30.0	30.2	1.14	902	26.8	-0.1	3.6E-04	-3.4
	E5	23.8	30.3	30.1	1.14	901	27.0	0.2	9.4E-04	-3.0
	E6	24.0	30.6	30.0	1.14	900	27.3	0.4	8.8E-04	-2.7

Tabla 7.12: Medidas experimentales e indicadores para la eficiencia óptica (continuación)

Las Tablas 7.13 y 7.14 muestran los valores de la potencia experimental (junto con el error) para cada punto de medida estable de las Tablas 7.11 y 7.12. También se exponen los datos calculados de la posición del Sol relativa al concentrador. En las dos últimas columnas se expone la eficiencia óptica determinada experimentalmente y la obtenidas mediante *ray-tracing* para su comparación.

Día	Punto	$C_p \delta \dot{V} (T_o - T_i)$	Obtenido mediante algoritmo						$G_{Tb} = \frac{DNI}{\cos \Theta_{cs}}$	$\frac{\dot{Q}_{exp}}{A_a}$	$\eta_0 K (\theta_t, \theta_l)$
	Medida	$\dot{Q}_{exp} [W]$	$\Theta_s [^\circ]$	$\Phi_s [^\circ]$	$\Theta_{cs} [^\circ]$	$\Phi_{cs} [^\circ]$	$\theta_t [^\circ]$	$\theta_l [^\circ]$	$G_{Tb} [W/m^2]$	η_{exp}	η_{r-t}
30/07/2009	A1	9268±324	40.9	-70.8	35.7	78.8	35.2	7.9	663	0.58	0.57
	A2	9398±325	40.0	-69.6	34.5	78.2	34.0	8.0	676	0.58	0.56
	A3	9614±327	39.1	-68.4	33.4	77.6	32.8	8.1	684	0.59	0.55
	A4	9712±328	38.2	-67.1	32.2	76.9	31.5	8.1	695	0.58	0.56
	A5	9932±330	37.3	-65.8	31.1	76.2	30.3	8.2	704	0.59	0.56
	A6	10070±332	36.4	-64.5	29.9	75.5	29.1	8.2	717	0.59	0.57
	A7	10182±333	35.5	-63.0	28.8	74.7	27.9	8.2	729	0.58	0.57
	A8	10385±335	34.7	-61.6	27.6	73.9	26.7	8.3	739	0.59	0.58
	A9	10479±336	33.8	-60.1	26.5	73.1	25.5	8.3	746	0.59	0.58
	A10	11059±342	30.6	-53.5	22.0	69.1	20.7	8.2	777	0.59	0.61
19/08/2009	B1	8704±318	41.8	59.9	38.8	-87.4	-38.7	2.1	641	0.57	0.58
	B2	8678±317	42.6	61.2	39.9	-88.2	-39.9	1.5	629	0.58	0.58
	B3	8543±316	43.5	62.5	41.0	-89.0	-41.0	0.9	615	0.58	0.58
	B4	8440±315	44.3	63.8	42.2	-89.7	-42.2	0.3	600	0.59	0.57
	B5	8265±313	45.2	65.0	43.3	-90.4	-43.3	-0.4	583	0.59	0.57
	B6	8041±311	46.1	66.2	44.4	-91.1	-44.4	-1.1	566	0.59	0.57
	B7	7860±309	47.0	67.4	45.6	-91.8	-45.6	-1.8	551	0.60	0.56
	B8	7670±307	47.9	68.5	46.7	-92.4	-46.7	-2.6	539	0.59	0.56
	B9	7451±305	48.8	69.7	47.9	-93.1	-47.8	-3.4	523	0.59	0.55
11/09/2009	C1	6981±319	52.9	-60.0	44.3	61.0	40.5	25.4	541	0.54	0.52
	C2	7046±318	52.0	-58.8	43.2	60.0	39.2	25.2	552	0.53	0.52
	C3	7043±317	51.2	-57.6	42.2	59.0	37.8	25.0	560	0.52	0.52
	C4	7175±320	50.4	-56.3	41.1	57.9	36.5	24.8	573	0.52	0.51
	C5	7284±321	49.6	-55.0	40.1	56.9	35.1	24.7	584	0.52	0.51
	C6	7422±323	48.8	-53.7	39.0	55.7	33.8	24.5	604	0.51	0.50
	C7	7626±324	48.0	-52.4	38.0	54.5	32.5	24.4	622	0.51	0.50
	C8	7774±326	47.2	-51.0	37.0	53.3	31.1	24.2	630	0.52	0.50
	C9	7846±326	46.5	-49.6	35.9	52.0	29.8	24.0	634	0.52	0.50
	C10	7897±327	45.8	-48.2	35.0	50.7	28.4	23.9	645	0.51	0.51
	C11	7987±328	45.0	-46.8	34.0	49.3	27.0	23.7	647	0.52	0.51
	C12	8127±329	44.3	-45.3	33.0	47.8	25.7	23.6	657	0.52	0.52

Tabla 7.13: Potencia ganada, ángulos solares, irradiancia G_{Tb} , y eficiencia óptica experimental y teórica para cada uno de los 45 puntos de medida estables

Día	Punto	$C_p \delta \dot{V} (T_o - T_i)$	Obtenido mediante algoritmo							$G_b = \frac{DNI}{\cos \Theta_{cs}}$	$\frac{\dot{Q}_{exp}}{A_a}$	$\eta_0 K(\theta_t, \theta_l)$
	Medida	$\dot{Q}_{exp} [W]$	$\Theta_s [^\circ]$	$\Phi_s [^\circ]$	$\Theta_{cs} [^\circ]$	$\Phi_{cs} [^\circ]$	$\theta_t [^\circ]$	$\theta_l [^\circ]$	$G_{Tb} [W/m^2]$	η_{exp}	η_{r-t}	
06/10/2009	D1	6914±319	55.8	-45.2	44.1	43.2	33.6	35.3	595	0.48	0.47	
	D2	7047±321	55.1	-43.9	43.3	41.9	32.1	35.0	606	0.48	0.47	
	D3	7146±3212	54.5	-42.6	42.4	40.6	30.7	34.7	617	0.48	0.47	
	D4	7275±323	53.8	-41.3	41.5	39.2	29.3	34.5	627	0.48	0.47	
	D5	7435±324	53.2	-39.9	40.7	37.8	27.8	34.2	635	0.49	0.47	
	D6	7516±325	52.6	-38.6	39.9	36.3	26.4	34.0	642	0.49	0.48	
	D7	7574±325	52.0	-37.2	39.1	34.8	24.9	33.7	650	0.49	0.48	
	D8	7597±324	51.5	-35.8	38.4	33.2	23.5	33.5	659	0.48	0.49	
07/10/2009	E1	8075±335	51.8	-35.7	38.7	33.0	23.6	33.9	679	0.50	0.49	
	E2	7901±333	51.3	-34.2	38.0	31.4	22.1	33.7	631	0.52	0.49	
	E3	7690±331	50.8	-32.8	37.3	29.7	20.7	33.5	663	0.48	0.50	
	E4	8405±338	50.2	-31.3	36.6	28.0	19.2	33.2	725	0.48	0.51	
	E5	8598±339	49.8	-29.8	35.9	26.2	17.7	33.0	730	0.49	0.51	
	E6	8627±340	49.3	-28.3	35.3	24.4	16.3	32.8	735	0.49	0.51	

Tabla 7.14: Potencia ganada, ángulos solares, irradiancia G_{Tb} , y eficiencia óptica experimental y teórica para cada uno de los 45 puntos de medida estables (continuación)

En la Figura 7.50 se exponen los valores de la eficiencia óptica de manera gráfica. Se observa una buena similitud entre los valores experimentales y los valores teóricos, sólo dos puntos de un total de 45 caen fuera del límite del error experimental. Se alcanza un coeficiente de correlación $R^2=0.87$ entre ambos conjuntos de valores.

Se concluye que se dispone de un modelo teórico para determinar el comportamiento óptico del CCStaR V1 con una incertidumbre del $\pm 4\%$. Este error ha sido tomado a partir del obtenido mediante procedimiento experimental.

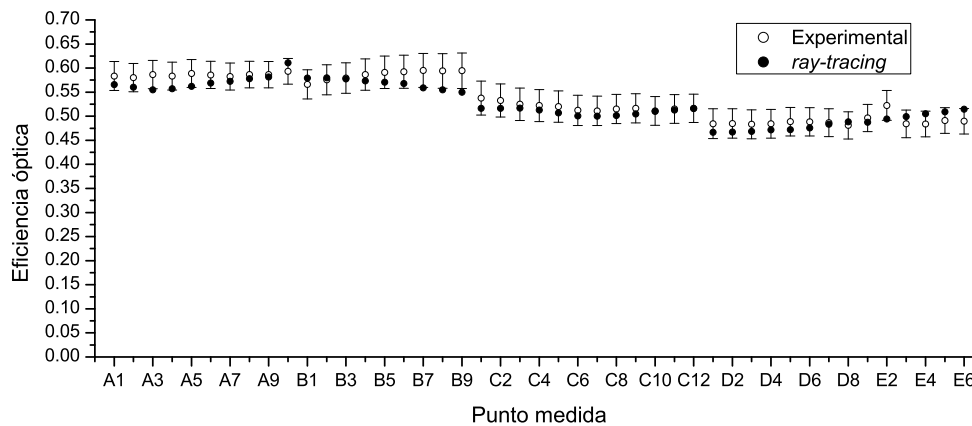


Figura 7.50: Eficiencia óptica experimental y calculada mediante *ray-tracing*

7.2.6. Determinación experimental del comportamiento térmico del CCStaR V1

Se procedió a ensayar el comportamiento térmico del concentrador para una temperatura media de trabajo T_{av} diferente a la temperatura ambiente. Se mantuvieron los requerimientos expuestos en la Tabla 7.10 a excepción de $(T_{av} - T_a) = \pm 5$ K. Se ensayó el prototipo para temperaturas de trabajo $T_{av} \approx 65, 70, 80, 90$, y 120°C , que en función de la temperatura ambiente corresponde a una diferencia de temperaturas $(T_{av} - T_a) \approx 35, 50, 55, 60$, y 85°C . En las Figuras 7.51a) y 7.51b) se puede ver gráficamente el conjunto de puntos de medidas en función de las temperaturas mencionadas. También se incluyen los puntos pertenecientes a temperatura ambiente de la Sección 7.2.5 porque van a ser utilizados en esta Sección. Los primeros 45 puntos de medida de las Figuras 7.51a) y 7.51b) corresponden a temperatura ambiente.

En cuanto a la distribución de la diferencia $(T_{av} - T_a)$ con la irradiancia directa en el plano del captador, se disponen valores que abarcan desde 410 W/m^2 hasta 780 W/m^2 , ver Figura 7.52a). Tan sólo se pudieron medir puntos estables en zonas alejadas de la incidencia normal al captador debido al problema de rotura de tubos receptores, expuesto en la Sección 7.2.1. En la Figura 7.52b) se muestran los ángulos transversal y longitudinal para cada punto de medida.

En total se obtuvieron 48 puntos estables para las temperaturas de trabajo mencionadas. Así pues, se dispone de un total de 93 puntos para determinar la curva de potencia ganada por el concentrador, Ecuación (7.3).

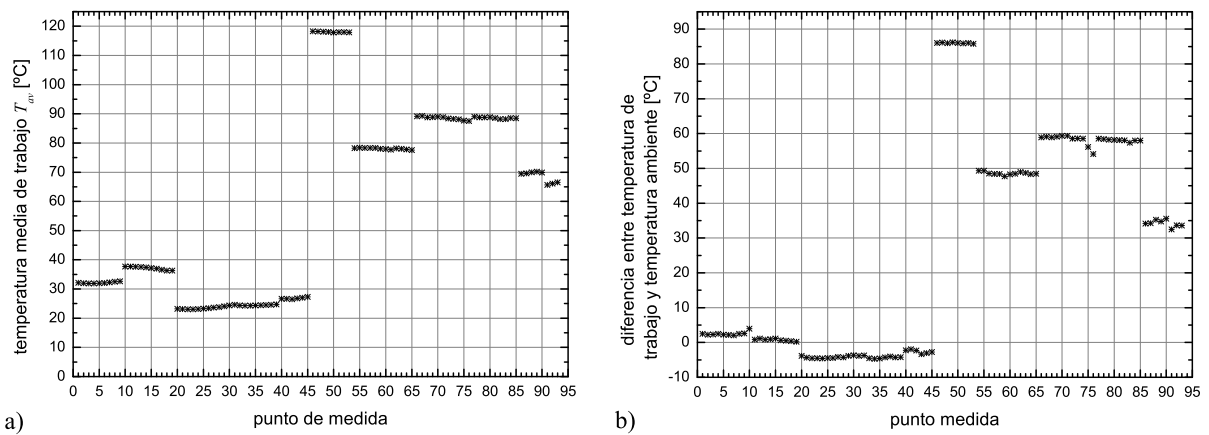


Figura 7.51: a) Temperatura de trabajo en el concentrador y b) Diferencia entre temperatura de trabajo y temperatura ambiente para cada punto de medida estable

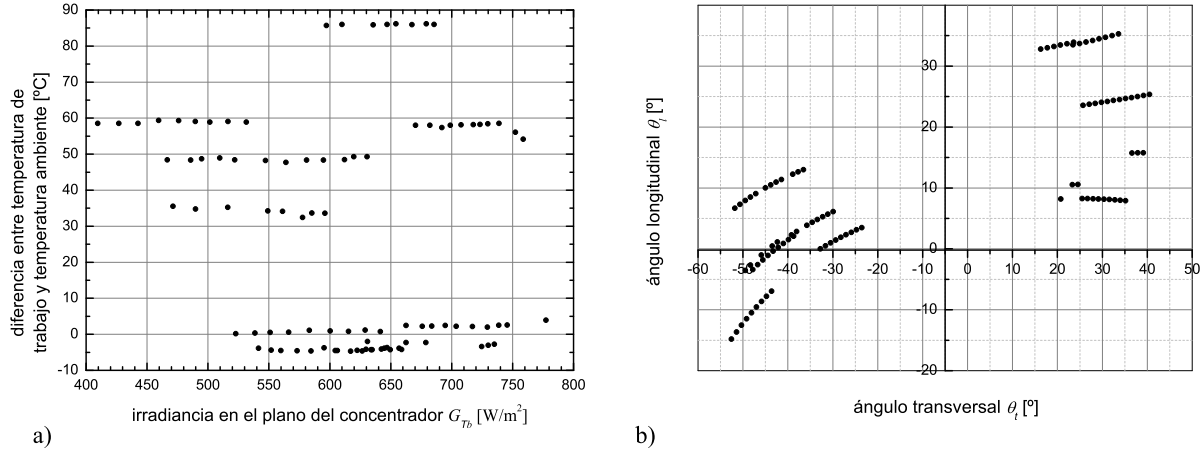


Figura 7.52: a) Diferencia entre temperatura de trabajo y temperatura ambiente en función de la irradiación directa en el plano del captador. b) Ángulos transversal y longitudinal para la posición relativa del Sol durante la campaña de ensayos

Para la identificación del IAM en colectores complejos, Rönnelid et al. (1997) propone un método extendido de Regresión Lineal Múltiple (RLM) a partir del comportamiento térmico del captador a temperatura ambiente. EL método consiste en segmentar el conjunto de valores que toman los ángulos θ_t y θ_l en subconjuntos de 10° . De esta manera se pueden obtener valores del IAM para aquellas posiciones que el Sol ocupa durante los ensayos experimentales. El valor de η_0 debe ser determinado para evitar tener un sistema no lineal. Esto implica disponer el captador muy próximo a incidencia normal durante al menos en uno de los ensayos.

En cuanto al CCStaR V1, no se pudo disponer del valor η_0 de manera experimental. Por ello, aquí se propone un método alternativo al de Rönnelid et al. (1997). El método consiste en incorporar los valores del IAM $K_b(\theta_t, \theta_l)$ determinado mediante *ray-tracing* para cada uno de los 93 puntos. De esta manera se evita tener un sistema no lineal en los parámetros independientes. Así pues, la curva para ajustar con el método de RLM es la siguiente:

$$y = \eta_0 x_0 - c_1 x_1 - c_2 x_2 - c_5 x_5 \quad (7.4)$$

donde las variables independientes lineales se relacionan con las magnitudes:

$$\begin{aligned} y &= \frac{\dot{Q}_g}{A_a} \\ x_0 &= K_b(\theta_t, \theta_l) G_{Tb} \\ x_1 &= (T_{av} - T_a) \\ x_2 &= (T_{av} - T_a)^2 \\ x_5 &= \frac{dT_{av}}{dt} \end{aligned} \quad (7.5)$$

Como se puede apreciar, el método aquí propuesto precisa de los valores $K_b(\theta_t, \theta_l)$ pero no del valor η_0 , que se pretende determinar con el ajuste multilíneal. Comparando ambos métodos, y desde el punto de vista matemático, la no linealidad se puede evitar conociendo el valor de η_0 de manera experimental, o bien facilitar los valores de $K_b(\theta_t, \theta_l) G_b$ para cada punto. Aquí se propone facilitar los valores de $K_b(\theta_t, \theta_l) G_b$ con la ayuda del *ray-tracing*.

Se ha utilizado el *t-ratio*, definido como $\frac{\text{valor coeficiente}}{\text{desviación estándar}}$, para conocer la bondad de los coeficientes en la RLM. El *t-ratio* debe ser mayor que dos para que pueda ser aceptado en la curva de rendimiento (AENOR, 2007; Rojas et al., 2008). En la Tabla 7.15 se muestran los resultados. Se puede observar que el parámetro c_1 presenta un valor del *t-ratio* inferior a dos, por tanto implica que la desviación estándar (D.E.) es demasiado grande y no se puede incorporar al modelo. Los otros parámetros tienen un *t-ratio* superior a dos. El ajuste RLM da un valor de $R^2=0.998$, y un coeficiente de correlación entre valores experimental y teórico de $R^2=0.947$.

Parámetro	Unidades	Valor (\pm D.E.)	<i>t-ratio</i>
η_0	-	0.698 (± 0.004)	169.9
c_1	$W/m^2 K$	0.19 (± 0.14)	1.3
c_2	$W/m^2 K^2$	0.010 (± 0.002)	5.0
c_5	$J/m^2 K$	8942 (± 2032)	4.4

Tabla 7.15: Resultados de la RLM considerando los parámetros η_0 , c_1 , c_2 , y c_5 respecto superficie reflectora

Posteriormente se procedió a realizar un análisis por RLM sin considerar el parámetro lineal en la temperatura c_1 de la Ecuación 7.4, tal como se recomienda en (AENOR, 2007; Rojas et al., 2008). Se analizó la bondad de la siguiente curva:

$$y = \eta_0 x_0 - c_2 x_2 - c_5 x_5 \quad (7.6)$$

En la Tabla 7.16 se muestran los resultados. Se observa que todos los parámetros considerados cumplen ampliamente con la condición de *t-ratio* mayor que dos. El ajuste RLM da un valor de $R^2=0.998$, y un coeficiente de correlación entre valores experimental y teórico de $R^2=0.945$. Ver la Figura 7.53 para la comparación gráfica entre valores experimentales y valores teóricos.

Parámetro	Unidades	Valor (\pm D.E.)	<i>t-ratio</i>
η_0	-	0.697 (± 0.004)	178.4
c_2	$W/m^2 K^2$	0.0127 (± 0.0007)	18.2
c_5	$J/m^2 K$	8626 (± 2025)	4.3

Tabla 7.16: Resultados de la RLM considerando los parámetros η_0 , c_2 , y c_5 respecto superficie reflectora

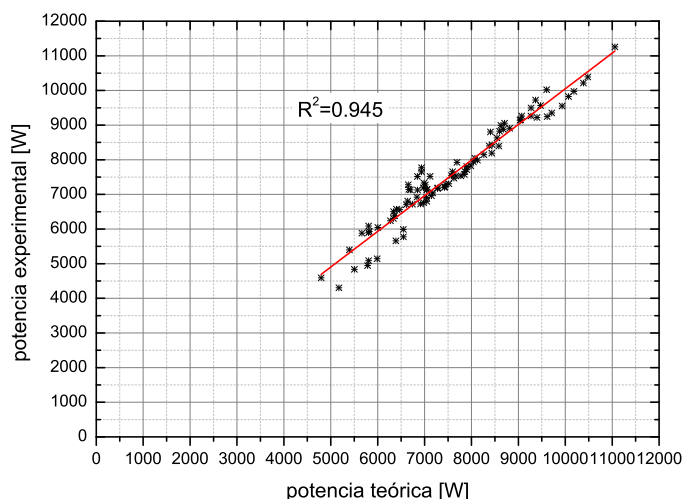


Figura 7.53: Potencia experimental *vs* potencia teórica determinada mediante RLM

En la Figura 7.54 se expone la potencia experimental por unidad de superficie y la teórica para cada punto de medida. Se observa una buena similitud entre ambos conjuntos de valores. No obstante, la diferencia más elevada se encuentra para dos conjuntos de datos, el primero es el correspondiente a $(T_{av} - T_a) \approx 50^\circ\text{C}$ con irradiancia $G_{Tb} \approx 560\text{-}630 \text{ W/m}^2$, y el segundo conjunto de datos es el correspondiente a valores $(T_{av} - T_a) \approx 60^\circ\text{C}$ con irradiancia $G_{Tb} \approx 410\text{-}530 \text{ W/m}^2$. La Figura 7.55 muestra el valor de la irradiancia en el plano del captador para cada punto de medida. Se observa una buena correlación entre ambas gráficas tal como cabía esperar.

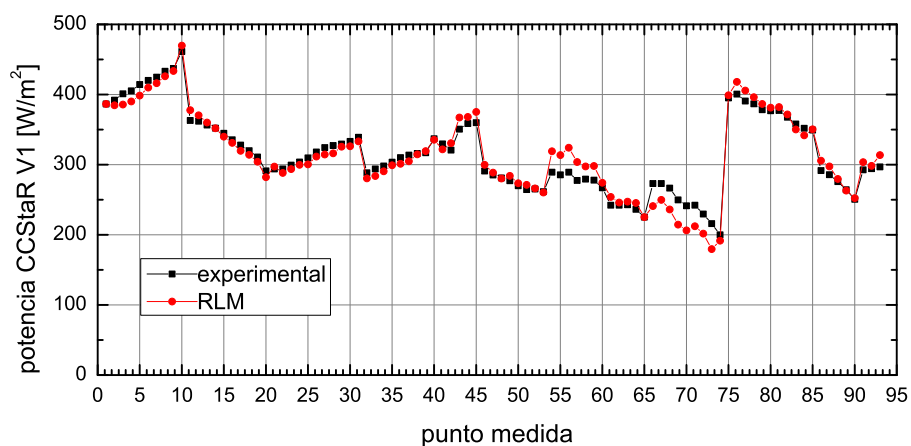


Figura 7.54: Potencia por unidad de superficie experimental y teórica determinada mediante ajuste por RLM para cada punto de medida

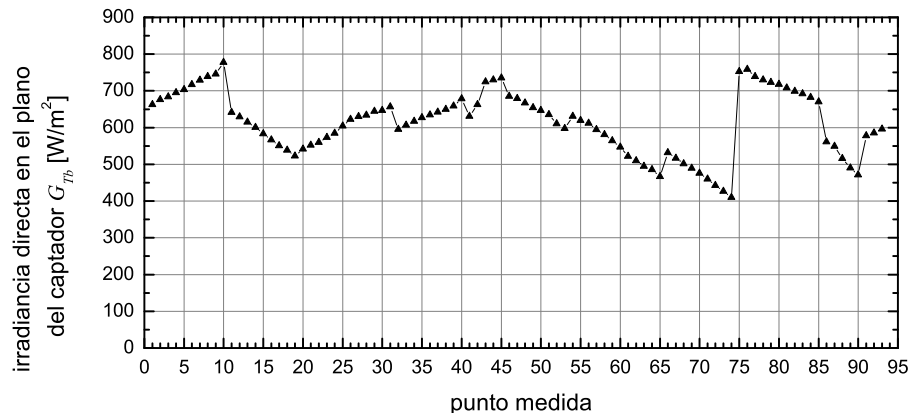


Figura 7.55: Irradiancia directa en el plano del captador para cada punto de medida

El valor de eficiencia óptica $\eta_0 = 0,697 \pm 0,004$ determinado mediante RLM puede compararse al valor estimado mediante *ray-tracing* $\eta_0 = 0,688 \pm 0,005$. La desviación entre ambos valores entran dentro de los límites del error. Concentradores solares caracterizados por una curva del tipo 7.6, donde se ha despreciado el término lineal con la temperatura, pueden encontrarse por ejemplo en el trabajo de Morin et al. (2012), donde se menciona el caso del cilindro-parabólico *Euro Trough II* con coeficientes $c_1 = 0 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $c_2 = 0.00047 \text{ W/m}^2\text{K}$. En cuanto al valor obtenido para el término capacitivo c_5 , cabe notar que la norma exige que al menos un ensayo se realice con alternancias de nubes y claros para poder obtener valores de $\frac{dT_{av}}{dt}$ superiores al rango $\pm 0,005 \text{ K/s}$. Durante los ensayos realizados, el conjunto de valores para el valor experimental $\frac{dT_{av}}{dt}$ se quedó en un rango inferior, ver Figura 7.56. Entonces, el parámetro c_5 no ha sido determinado según las especificaciones de la norma, sin embargo muestra un valor de *t-ratio* superior a dos y por tanto juega un papel importante en la curva característica del concentrador solar.

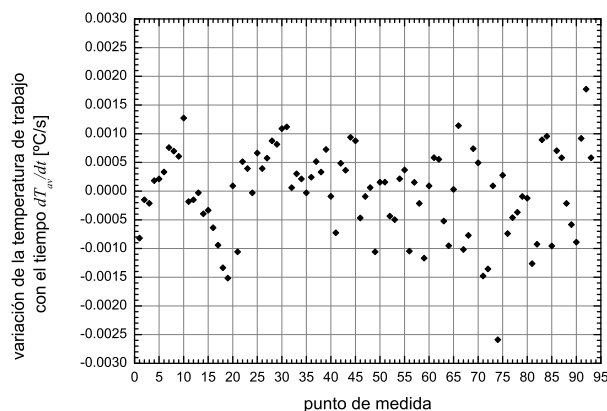


Figura 7.56: Valores que toma el valor experimental $\frac{dT_{av}}{dt}$ para cada punto de medida

Con el objetivo de conocer la bondad lineal del la RLM aquí realizada, se procede a aplicar un test estadístico a partir del análisis de la varianza.

En estadística, el análisis de la varianza ANOVA (ANalysis Of VAriance, según terminología inglesa) de un estadístico (F de Fisher) se utiliza para reforzar la hipótesis de linealidad entre el modelo teórico y los datos experimentales, (Sachs, 1978). El análisis consiste en plantear la hipótesis de que las medidas experimentales han dado por casualidad un buen ajuste en el análisis RLM (y por tanto no existe cierta dependencia lineal con las variables independientes) con la finalidad de poder rechazar dicha hipótesis, y así reforzar la hipótesis de linealidad.

Para ello, se calcula el estadístico F de Fisher, que es el cociente de la Varianza de los datos explicados por el modelo teórico entre la Varianza de los datos que no pueden ser explicados por el modelo. Con la ayuda del programa informático *Origin Pro V8.1*, se ha calculado la tabla ANOVA, ver Tabla 7.17. Dado que el estadístico F sigue una distribución de probabilidad de Fisher, con 3 y 90 grados de libertad, en la Tabla se muestra la probabilidad de obtener un valor de F mayor al obtenido. Como esta probabilidad es inferior a 0.000, se rechaza la hipótesis de que las medidas experimentales han dado por casualidad un buen ajuste en el análisis RLM, y por consiguiente se refuerza la hipótesis del modelo lineal.

Fuente de variación	Grados de libertad	Sumas de los cuadrados	Media de los cuadrados	valor F	Probabilidad > F
Modelo teórico	3	9587440	3195781	16059	0.000
Residual	90	17910	199		
Total	93	9587440			

Tabla 7.17: Tabla para el análisis ANOVA del factor F de Fisher

Por todo ello, la curva de eficiencia del CCStaR V1 viene dada por la siguiente expresión:

$$\eta = 0,697 (\pm 0,004) K_b (\theta_t, \theta_l) - 0,0127 (\pm 0,0007) \frac{(T_{av} - T_a)^2}{G_{Tb}} - 8626 (\pm 2025) \frac{dT_{av}}{dt} \frac{1}{G_{Tb}} \quad (7.7)$$

7.3. Conclusiones

Se ha puesto a punto un banco de ensayos para la caracterización térmica de captadores solares, tomando como referencia las indicaciones de la norma europea EN-12975-2:2006. Se han ensayado dos prototipos de concentración con geometría variable. El banco ha permitido reproducir las condiciones necesarias para realizar ensayos con el método cuasidinámico.

Se ha construido un prototipo basado en la geometría FMSC, denominado CCStaR V0. El CCStaR V0 ha sido ensayado experimentalmente para determinar la eficiencia óptica. Mediante *ray-tracing* se ha generado un modelo teórico que describe el comportamiento térmico a temperatura ambiente. Tan sólo se han podido comparar nueve puntos experimentales con el modelo teórico. Estos nueve puntos presentan muy buena similitud con el modelo. Los valores del IAM han sido presentados de manera gráfica.

A partir de la experiencia adquirida con el CCStaR V0, se ha diseñado, y construido, un prototipo basado en la geometría CSFMSC con un espejo parabólico (los detalles no se muestran en la Tesis Doctoral). El prototipo se ha llamado CCStaR V1. Este prototipo ha sido caracterizado geométricamente con un método sencillo y de bajo coste.

Las parábolas fabricadas presentan una dispersión angular de $\sigma=7.5$ mrad. Se ha visto que el prototipo presenta elevados errores de posicionamiento en los tubos receptores. Esto repercute de manera directa en la captación de la energía solar.

Los tubos receptores de tipo Sydney, adquiridos para el CCStaR V1, no tienen las prestaciones necesarias para soportar los niveles de concentración del reflector. No obstante, se ha podido ensayar el concentrador solar hasta una temperatura de trabajo de 120°C evitando posiciones del Sol próximas a la normal del captador.

Se ha generado un modelo teórico del CCStaR V1 con el programa *ray-tracing*, y se han expuesto las curvas ópticas del CCStaR V1. Se aprecia que el comportamiento óptico del prototipo está por debajo del *diseño teórico* correspondiente.

El CCStaR V1 ha sido ensayado desde temperatura ambiente hasta los 120°C. Los ensayos realizados a temperatura ambiente han permitido validar el modelo teórico.

Una vez validado el modelo teórico, y con datos experimentales realizados a altas temperaturas, se ha determinado la curva de rendimiento del captador en condiciones cuasidinámicas. La curva de rendimiento obtenida presenta, estadísticamente, una buena correlación con los datos experimentales.

Combinar valores del IAM (determinado mediante *ray-tracing*) con datos experimentales, ha demostrado ser una alternativa para determinar la curva de rendimiento de concentradores solares de gran envergadura. Este método no precisa determinar el valor de η_0 de manera experimental.

La eficiencia óptica del CCStaR V1 determinada por *ray-tracing* y la obtenida por RLM

presentan una desviación inferior al 1 %. El prototipo CCStaR V1 tiene una eficiencia óptica en incidencia normal próxima al 70 %.

Los experimentos llevados a cabo han permitido validar el modelo teórico *ray-tracing* desarrollado en la Tesis Doctoral.

Capítulo 8

Conclusiones finales

Esta Tesis describe el comportamiento óptico y térmico de un concentrador solar de reflector estacionario y foco móvil. Las geometrías aquí analizadas se basan en los conceptos *Fixed Mirror Solar Concentrator* (FMSC), y *Curved Slats Fixed Mirror Solar Concentrator* (CSFMSC). Estas geometrías han sido muy poco estudiadas en comparación a los concentradores solares de características similares (Fresnel y cilindro-parabólicos). Se presentan, por primera vez, resultados ópticos obtenidos a partir de métodos numéricos basados en trazado de rayos tridimensional.

La herramienta de simulación desarrollada permite analizar ópticamente cualquier geometría considerando las ecuaciones ópticas de Fresnel. Tiene en cuenta la dispersión angular de los espejos, la distribución no uniforme de la radiación solar, y el carácter estocástico en la absorptividad. Permite incorporar partes móviles en función de la posición del Sol, como por ejemplo el movimiento del receptor en los casos aquí estudiados.

Se han definido las geometrías FMSC y CSFMSC en función de tres parámetros de diseño, y se ha analizado su influencia en el modificador de ángulo IAM. Se ha visto que cada uno de los parámetros afecta de manera diferente a las componentes transversal y longitudinal. Se ha analizado la factorización del IAM, y se ha incorporado un término para tener en cuenta los efectos de borde. La factorización propuesta reproduce los valores teóricos del IAM para los ángulos solares que presentan mayor interés, a pesar de que causa errores elevados para ángulos transversal y longitudinal elevados.

La eficiencia térmica anual para todos los diseños estudiados ha sido cuantificada. Para ello se han considerado tres climas ubicados a diferentes latitudes ($\approx 30^\circ$, 40° , 50°). Se ha obtenido una optimización paramétrica del FMSC y del CSFMSC a una temperatura de trabajo de 200°C . Se ha visto que ambos conceptos pueden conseguir mejor rendimiento térmico que los colectores de tubo de vacío. El diseño que presenta más interés es el caso de CSFMSC con un espejo parabólico.

Un concentrador parabólico de foco móvil presenta entre un 2 % y un 6 % mejor rendimiento

térmico que un diseño formado por espejos planos FMSC, y puede capturar hasta un 25 % más de energía que un colector de tubos de vacío. No obstante, estos valores pueden verse incrementados si se realiza una optimización de la trayectoria que describe el receptor.

Un diseño de captador basado en el CSFMSC puede constituir una alternativa atractiva para el suministro de energía térmica en el rango de media temperatura, ya que combina una elevada eficiencia térmica con una buena integrabilidad en cubiertas gracias a su reflector estacionario.

Se han realizado ensayos experimentales de dos prototipos. El primero, basado en el concepto FMSC, ha sido ensayado a temperatura ambiente. Se ha generado un modelo teórico del mismo mediante *ray-tracing*. El modelo teórico generado muestra una gran similitud con los valores experimentales.

El segundo prototipo se basa en el concepto CSFMSC con un espejo parabólico. El modelo teórico generado mediante *ray-tracing* muestra también una buena concordancia con los valores experimentales a temperatura ambiente. Este prototipo ha sido ensayado a temperaturas de hasta 120°C, y la curva de eficiencia obtenida mediante RLM presenta una buena correlación con los datos experimentales.

Combinar valores del IAM obtenidos con *ray-tracing* con datos experimentales a diferentes temperaturas, se presenta como un método alternativo en la caracterización térmica de sistemas complejos.

El trabajo experimental aquí desarrollado ha permitido transferir conocimiento a una empresa de base tecnológica. Estos estudios forman parte de patentes de invención, y han sido incorporadas al sector industrial. Los estudios realizados también han permitido identificar mejoras en el prototipo CCStaR V1. Estas mejoras han sido incorporadas en una nueva versión del concentrador, CCStaR V2, que en estos momentos están siendo evaluadas de manera experimental.

Bibliografía

- AENOR, 2007. Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 2: Métodos de ensayo. 2.5, 7, 7.2.6, 7.2.6
- Alorda, B., Moia, A., Pujol, R., Martínez, V., 2006. Low-cost orientation system for a concentrating solar collector with static reflector and tracking receiver. In: Proceedings in International Congress on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ06. ISBN: 84-609-6604-6. 7.1.1
- Antonova, R. A., Tarnizhevskii, 1986. A facet concentrator of solar energy with fixed reflector and mobile thermal collector. *Geliotekhnika* 22, 21–25. 3.1
- ASHRAE, 2011.
URL <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> 4.3
- Balarasa, C. A., Grossmanb, G., Henningc, H. M., Infante Ferreirad, C. A., Wangd, L., Wiemkenc, E., 2007. Solar air conditioning in europe an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 299–314. 1.2
- Balasubramanian, V., Sankarasubramanian, G., 1993. Stretched tape design of fixed mirror solar concentrator with curved mirror elements. *Solar Energy* 51, 109–119. 6.1
- Bar-Lev, A., Waks, S., Grossman, G., 1983. Analysis of a combined thermal-photovoltaic solar system based on the spherical reflector/tracking absorber concentrator. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* 105, 322–328. 1
- Beckman, W. A., Klein, S. A., Duffie, J. A., 1977. *Solar Heating Design: By the F-Chart Method*. Wiley Interscience, New York. 2.3.3, 2.4
- Blanco, M., Alarcón, D., López, T., Lara, M., 2001. Computing of the solar vector. *Solar Energy* 70, 431–441. 7.1.4
- Bokhoven, T., N., C., Drück, H., Pilgaard, O., Stryi Hipp, G., Weiss, W., Wit, 2006. Solar thermal vision 2030 vision of the usage and status of solar thermal energy technology in europe and the corresponding research topics to make the vision reality. Tech. rep., European Solar Thermal Technology Platform. (document), 1.2, 1.3

- Brogren, M., 2004. Optical efficiency of low-concentrating solar energy systems with parabolic reflectors. Ph.D. thesis, Uppsala university. 3
- Buie, D., 2004. Optical considerations in solar concentrating systems. Ph.D. thesis, University of Sydney. 2.4, 2.4
- Buie, D., 2005. Corrigendum to “The effective size of the solar cone for solar concentrating system” [Solar Energy 74 (2003) 417-427]. Solar Energy 79, 568–570. 5.2
- Chemisana, D., López-Villada, J., Coronas, A., Rosell, J., C., L., 2012. Building integration of concentrating systems for solar cooling applications. Applied Thermal Engineering. In press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.005>. 1.3
- Donald, G. B., George, L. S., Daryl, R. B., 1978. Flat-sided rectilinear as a solar concentrator: an analytical study. Applied Optics 17, 1870–1883. 1
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. Solar Engineering of thermal Processes. John Wiley and Sons, Inc. 1.3, 2.3.2, 2.5, 2.5, 2.5, 2.6, 2.6, 2.6, 4.5, 4.5, 7.1.3
- Durán, J. C., Nicolás, R. O., 1985. Development and applications of a two-dimensional optical analysis of non-perfect cylindrical concentrators. Solar Energy 34, 257–269. 3.1, 2
- Eberly, D. H., 2001. 3D Game Engine Design: A Practical to Real-Time Computer Graphics. Morgan Kaufmann Publishers. 4.2.1
- Euclid, 2007. Euclid’s Elements. Green Lion Press. 3.2.1
- Fernández, A., Zarza, E., Valenzuela, L., M., P., 2010a. Parabolic-trough solar collectors and their applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 1695–1721. 1.3
- Fernández, A., Zarza, E., Pérez, M., Valenzuela, L., Rojas, E., Valcárcel, E., 2010b. Experimental assessment of a small-sized parabolictrough collector. capsol project. In: Eurosun 2010. International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings. Austria. ISBN: 978-3-901425-13-4. (document), 1.4
- Fischer, S., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., Perers, B., Bergquist, P., Hellström, B., 2004. Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2. Solar Energy 76, 117–123. 2.5
- Gee, R., 2004. Solar powering of high efficiency absorption chiller. in: Final report. solar cooling, llc. Tech. rep., U.S. Dept. of Energy. 3.1
- Glembin, J., Rockendorf, J., Scheuren, J., 2010. Internal thermal coupling in direct-flow coaxial vacuum tube collectors. Solar Energy 84, 1137–1146. 4.5

- Gombert, A., Glaubitt, W., Rose, K., Dreibholz, J., Bläsi, B., Heinzel, A., Sporn, D., Döll, W., Wittwer, V., 2000. Antireflective transparent covers for solar devices. *Solar Energy* 68, 357–360. 2.3.2
- Grass, C., Schoeljopf, W., Staudacher, L., Hacker, Z., 2004. Comparison of the optics of non-tracking and novel types of tracking solar thermal collectors for process heat applications up to 300°C. *Solar Energy* 76, 207–215. 3.1, 3
- Hecht, E., Zajac, A., 1986. *Optica*. Addison Wesley. 2.3
- Hoffschmidt, B., Schwarzer, K., Späte, F., Kötter, J., Ebert, M., Sierck, O., 2006. Development of a small modular parabolic trough collector. In: *Proceedings in SolarPACES. 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies. 2006*. Sevilla, SP. ISBN 84-7834-519-1. 1.3
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 2001. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley and Sons, Inc. 7.2.4
- IPCC, W., 2007. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. ISBN 978-0-521-88009-1. 1.1
- ISES, 2001. *Solar energy. The state of the art*. ISES position papers. James and James (Science Publishers) Ltd. 1.3, 3.1, 1
- Johnston, G., 1995. On the analysis of surface error distributions on concentrated solar collectors. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* 117, 294–296. 2.3.1
- Jones Peter, D., Wang, L., 1995. Concentration distributions in cylindrical receiver/paraboloidal dish concentrator systems. *Solar Energy* 54, 115–123. 3
- Kandapl, T. C., Mathur, S. S., N., S. R., 1980. Performance of a two-stage solar concentrator. *Applied Energy* 7, 191–199. 1
- Kreider, J., 1975. Thermal performance analysis of the stationary reflector/tracking absorber (SRTA) solar concentrator. *ASME Journal of Heat Transfer* 97, 451–456. 3.1
- Kumar, R., 1974. *Theoretical analysis of fixed mirror solar concentrator*. Ph.D. thesis, Arizona State University. 3.1, 3.2.2, 2, 6.1
- Lüpfert, E., Pottler, K., Ulmer, S., Riffelmann, K. J., Neumann, A., Schiricke, B., August 2005. Parabolic trough analysis and enhancement techniques. In: *Proceedings of ISEC2005*. No. ISEC2005-76023. ASME. 7.2.2

- Lüpfert, E., Pottler, K., Ulmer, S., Riffelmann, K. J., Neumann, A., Schiricke, B., 2007. Parabolic trough optical performance analysis techniques. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* 129, 147–152. 5.2, 7.2.2
- Martínez, V., Pujol, R., Moia, A., 2008. Innovative fixed mirror solar concentrator for process heat. In: *Book of Proceedings, Eurosun 2008. 1st International Congress on Heating, Cooling, and Buildings*. Lisbon. (document), 7.2.1, 7.2.1, 7.36
- Martínez, V., Pujol, R., Moia, A., Schweiger, H., 2006. Analysis of a stationary parabolic linear concentrator with tracking absorber. In: *Proceedings in SolarPACES. 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*. Sevilla. ISBN 84-7834-519-1. 3.1, 6.1
- Martínez Moll, V., Pujol Nadal, R., Montesino Semper, J., Moia Pol, A., Paz Vinales, H., Trobat Obrador, G., 2007a. Unidad reflectora-concentradora, procedimiento de fabricación de la misma, y dispositivo captador solar comprendiendo dicha unidad reflectora-concentradora. *Tecnología Solar Concentradora S.L. Spain Patent ES2322837B1*. 7.2.1, 7.2.1
- Martínez Moll, V., Pujol Nadal, R., Paz Vinales, H., Riba Romeva, C., Martínez Verdú, D., Moia Pol, A., Schweiger, H., 2007b. Dispositivo concentrador-captador de energía solar. *Tecnología Solar Concentradora S.L. Spain Patent ES2326353B1*. 3.1, 7.2.1, 7.2.1
- McIntire, W. R., 1982. Factored approximation for biaxial incident angle modifiers. *Solar Energy* 29, 315–322. 2.5, 5.3.4
- Mijatović, M., Veselinović, V., D., D., 1986. Inverse iso-intensity absorber problem. *Solar Energy* 37, 25–29. 2
- Morin, G., Dersch, J., Platzer, W., Eck, M., Häberle, A., 2012. Comparison of linear fresnel and parabolic trough collector power plants. *Solar Energy* 86, 1–12. 7.2.6
- Neumann, A., Witzke, A., Jones, S., Schmitt, G., 2002. Representative terrestrial solar brightness profiles. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* 124, 198–204. 5.2
- Nicolás, R. O., Durán, J. C., 1980. Generalization of the two-dimensional optical analysis of cylindrical concentrators. *Solar Energy* 25, 21–31. 3.1, 2
- NREL, 2011.
URL <http://www.nrel.gov/rredc/> 4.3
- Perers, B., 1997. An improved dynamic solar collector test method for determination of non-linear optical and thermal characteristics with multiple regression. *Solar Energy* 59, 163–178. 2.5

- Pettit, R. B., 1977. Characterisation of the reflected beam profile of solar mirror materials. *Solar Energy* 19, 733–741. 2.3.1, 2.3.1, 7.2.1
- Pettit, R. B., Vititoe, C. N., Biggs, F., 1983. Simplified calculational procedure for determining the amount of intercepts sunlight in an imaging solar concentrator. *ASME Journal of Solar Energy Engineering* 105, 101–107. 2
- Pottler, K., Lüpfer, E., Johnston, G., Shortis, M., 2005. Photogrammetry: A powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components. *J. Solar Energy Engineering* 1, 94–101. 7.2.2
- Pujol, R., Martínez, V., Moia, A., Schweiger, H., 2006. Analysis of stationary fresnel like concentrator with tracking absorber. In: *Proceedings in SolarPACES. 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*. Sevilla. ISBN 84-7834-519-1. 3.1, 3
- Rabl, A., 1976. Comparison of solar concentrators. *Solar Energy* 18, 93–111. 2.6, 1
- Riffelmann, K. J., Neumann, A., Ul, 2006. Performance enhancement of parabolic trough collectors by solar flux measurement in the focal region. *Solar Energy* 80, 1303–1313. 5.2
- Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., 1973. *Handbook of Heat Transfer*. McGRAW-HILL. 4.5
- Rojas, D., Beermann, J., Klein, S. A., D.T., R., 2008. Thermal performance testing of flat-plate collectors. *Solar Energy* 82, 746–757. 7.2.6, 7.2.6
- Rojas, M. E., Fernández, A., Zarza, E., 2006. Theoretical evaluation of parabolic trough designs for industrial process applications. In: *Proceedings in SolarPACES. 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*. Sevilla. ISBN 84-7834-519-1. 1.3
- Rönnelid, M., 1998. Optical design of stationary solar concentrators for high latitudes. Ph.D. thesis, Uppsala University. 2.3.3
- Rönnelid, M., Perers, B., Karlsson, B., 1997. On the factorisation of incidence angle modifiers for cpc collectors. *Solar Energy* 59, 281–286. 5.3.4, 7.2.6
- Russell Jr, J. L., 1973. Investigation of a central station solar power plant. Tech. rep., General Atomic Company; Report GA-A12759. 3.1, 3.1
- Russell Jr, J. L., 1976. Principles of the fixed mirror concentrator. Tech. rep., General Atomic Company. SPIE Vol. 85 Optics in Solar Energy Utilization. 3.1, 6.1
- Sachs, L., 1978. *Estadística Aplicada*. Labor S.A. ISBN 84-335-6412-9. 7.2.6

- Schweiger, H., Mendes, J., Benz, N., Hennecke, K., Prieto, G., Cusi, M., Gonçalves, H., 2000. The potential of solar heat in industrial processes. In: Book of Proceedings of EuroSun 2000, ISES-Europe Solar Congress, Copenhagen, Denmark, June 2000. 1.2
- Sims, R., 2004. Renewable energy: a response to climate change. *Solar Energy* 76, 9–17. 1.1, 1.1
- Souka, A. F., Safwat, H. H., 1966. Optimum orientations for the double exposure flat-plate collector and its reflector. *Solar Energy* 10, 170–174. 2.5
- Steward, W. G., Kreith, F., 1975. Stationary concentrating reflector cum tracking absorber of a solar energy collector: optical design characteristics. *Applied Optics* 14, 1509–1512. 3.1
- Tesfamichael, T., Wäckelgård, E., 2000. Angular solar absorptance and incident angle modifier of selective absorbers for solar thermal collectors. *Solar Energy* 68, 335–341. 2.3.3, 5.2, 7.1.3, 7.2.3
- TRNSYS, 2004. A transient system simulation program, version 16. University of Wisconsin. 4.3
- TÜV, 2008. Qualification of a Solar Collector according to DIN EN 12975-2:2006. TÜV Report No 21208197. Tech. rep., TÜV Rheinland Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH. 4.5, 4.5, 5.2
- Weiss, W., Biermayr, P., 2009. Potencial of solar thermal in europe. Tech. rep., AEE Institute for Sustainable Technologies and Vienna University of Technology. 1.2
- Weiss, W., M., R., 2008. Process heat collectors. State of the art within Task 33. SolarPaces Task iv. Tech. rep., International Energy Agency and SolarPaces. 1.2, 1.3
- Weiss, W., Rom, 2005. Solar heat for industrial processes. ieA shc - task 33. ieA solarpaces - task iv. Tech. rep., International Energy Agency. SolarPaces. (document), 1.3, 1.5
- Winter, C. J., Sizman, R. L., Vant-Hull, L. I., 1991. *Solar Power Plants: Fundamentals, Technology, Systems, Economics*. Springer-Verlag. Berlin. 2.3.1, 2.6, 2.6, 3.1, 4.5, 4.5